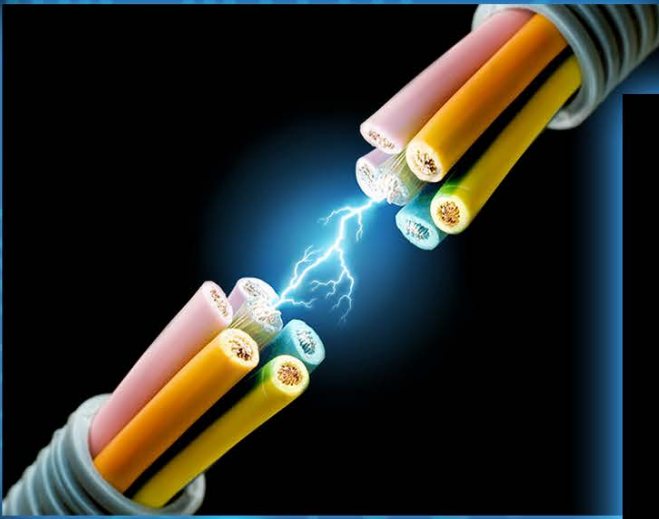
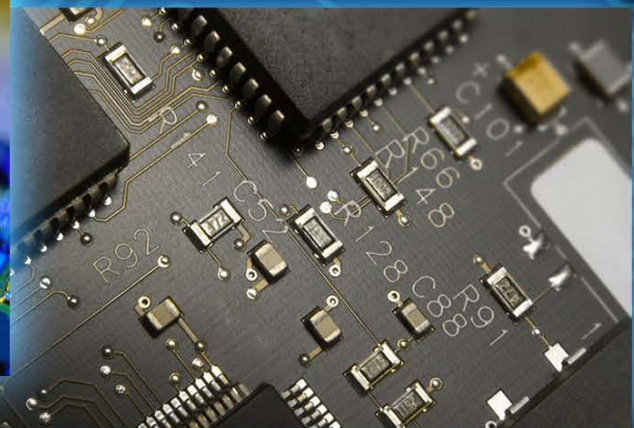
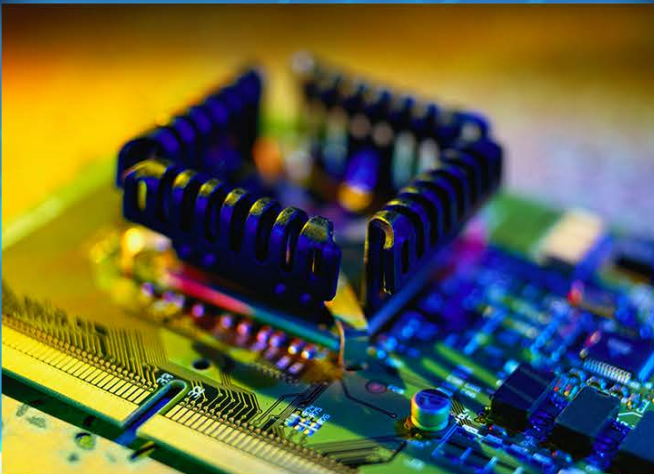


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



Зайцев Р.В., Кіріченко М.В.,
Горбулик В.І., Хрипунов Г.С.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електричних кіл» для студентів напрямку 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка»



Харків 2015

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Теорія електричних кіл»
для студентів напрямку 6.05080101
«Мікро- та наноелектроніка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 19.12.14

Харків НТУ «ХПІ» 2015

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Теорія електричних кіл» для студентів напрямку 6.05080101 «Мікро- та наноелектроніка» / Уклад.: Р.В. Зайцев, М.В. Кіріченко, В.І. Горбулик, Г.С. Хрипунов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – 92 с.

Укладачі: Р.В. Зайцев,
М.В. Кіріченко,
В.І. Горбулик
Г.С. Хрипунов

Рецензент доц. І.В. Федорін

Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та
геліоенергетики

ВСТУП

Лабораторні заняття з курсу «Теорія електричних кіл» є найважливішим елементом навчального процесу в плані придбання студентами навичок в плануванні експерименту, використанні вимірювальних приладів і апаратури, в експериментальному дослідженні схем, пристроїв та електронних елементів, а також в засвоєнні і практичній конкретизації лекційного матеріалу.

До методичних вказівок входять лабораторні роботи по всіх розділах дисципліни «Теорія електричних кіл». Для кожної лабораторної роботи сформульовано мету досліджень, дано перелік необхідних приладів та обладнання, визначені конкретні завдання та порядок виконання роботи, а також приведені контрольні питання і зазначений обсяг звітних матеріалів. Короткий виклад теоретичних відомостей з досліджуваного питання допоможе студентам у підготовці до лабораторних робіт і їх виконанню.

Особливість методичних вказівок до лабораторних робіт в тому, що роботи мають навчально-дослідницький характер. Вони розвивають у студентів навички проведення експериментальних досліджень, знайомлять з методами досліджень процесів в електричних ланцюгах і технікою виміру їх параметрів, поводження з електротехнічними пристроями чи електровимірювальною апаратурою.

ПРАВИЛА ВНУТРІШНЬОГО РОЗПОРЯДКУ І ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

При роботі в лабораторії електротехніки та електроніки для уникнення нещасних випадків, а також передчасного виходу з ладу приладів і обладнання студент при виконанні лабораторних робіт повинен виконувати наступні правила внутрішнього розпорядку і техніки безпеки.

1. До роботи в лабораторії допускаються студенти, знайомі з правилами внутрішнього розпорядку і техніки безпеки.

2. Після ознайомлення з правилами внутрішнього розпорядку та інструктажу з техніки безпеки кожен студент повинен розписатися в спеціальному журналі.

3. Працюючи в лабораторії забороняється приносити з собою речі і предмети, які захацують робочі місця.

4. У лабораторії забороняється голосно розмовляти, покидати робочі місця без дозволу викладача і переходити від одного стенду до іншого.

5. Приступаючи до роботи в лабораторії, студентська група ділиться на бригади, які потім розподіляються по лабораторним столам.

6. Електричні ланцюги збираються при відключеному джерелі живлення. При необхідності змін в ланцюзі в процесі роботи потрібно відключити джерело живлення.

7. Збірку електричного кола виконують сполучними проводами в суворій відповідності зі схемою, представленою в методичних вказівках, забезпечуючи при цьому надійність електричних контактів всіх роз'ємних сполук. При збірці необхідно стежити, щоб з'єднувальні дроти не скручувалися петлями.

8. Зібраний електричний ланцюг пред'являється для перевірки викладачеві або лаборанту.

9. Включення електричного кола під напругу проводиться після перевірки її викладачем з його дозволу і в його присутності.

10. При виявленні несправності в ланцюзі, появи специфічного запаху, пошкодження обладнання або приладів необхідно негайно відключити електроживлення стенду і сповістити про це викладача або лаборанта.

11. Перед включенням регульованого джерела живлення необхідно переконатися, що його ручка знаходиться в положенні, відповідному мінімальній вихідній напрузі.

12. При роботі з конденсаторами слід пам'ятати, що на їх затискачах, відімкнутих від мережі, якийсь час зберігається електричний заряд, який може бути причиною удару електричним струмом.

13. При роботі з мультиметром слід правильно вибирати рід вимірюваної величини, межу її вимірювання та гнізда для підключення щупів. При роботі з осцилографом щоб уникнути перевантаження по входу необхідно правильно обрати межу вимірювання його підсилювача.

14. При використанні електричних машин строго виконуйте правила і порядок їх пуску.

15. Після затвердження викладачем результатів лабораторної роботи необхідно розібрати досліджуваний електричний ланцюг і привести в порядок робоче місце.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Підготовка до лабораторних робіт. Експериментальні задачі, запропоновані на лабораторних заняттях, можуть бути успішно вирішені у відведений відповідно до розкладу занять час тільки за умови ретельної попередньої підготовки до кожної з них. Тому для виконання лабораторних робіт студент повинен керуватися наступними положеннями:

- 1) попередньо ознайомитися з графіком виконання лабораторних робіт;
- 2) уважно ознайомитися з описом відповідної роботи і встановити, в чому полягає основна мета і завдання цієї роботи;
- 3) по лекційному курсу і відповідним літературними джерелами вивчити теоретичну частину, що відноситься до даної лабораторної роботи;
- 4) до проведення лабораторної роботи підготувати в робочому зошиті відповідні схеми, таблиці спостережень, розрахункові формули;
- 5) завершує етап підготовки до виконання лабораторної роботи складання відповідей на контрольні запитання, наведені в методичних вказівках.
- 6) непідготовлені студенти до роботи не допускаються.

Виконання лабораторної роботи. Для успішного виконання лабораторних робіт необхідно виконання наступних вимог.

1. Перед складанням електричного кола студенти повинні попередньо ознайомитися з електричним устаткуванням і вимірювальними приладами, призначеними для проведення відповідної лабораторної роботи. При цьому слід переконатися, що лабораторний стенд знеструмлений.

2. Збірку ланцюга необхідно проводити в точній відповідності із завданням. Доцільно спочатку з'єднати всі елементи ланцюга, що включаються послідовно, а потім - паралельно. При складанні доцільно користуватися проводами різних кольорів, наприклад, для паралельних гілок.

3. Після закінчення складання електричний ланцюг обов'язково повинен бути пред'явлений до перевірки. Включати ланцюг під напругу можна тільки з дозволу викладача або лаборанта.

4. Запис показань всіх приладів в процесі виконання роботи слід проводити по можливості одночасно і швидко. Слід уникати перерви розпочатої серії спостережень і у всіх випадках, коли виникає сумнів у правильності отриманих спостережень, їх необхідно повторити кілька разів.

5. Результати вимірювань заносяться кожним студентом в свій робочий зошит.

6. Після виконання окремого етапу лабораторної роботи результати дослідження разом з найпростішими контрольними розрахунками пред'являються для перевірки викладачеві до розбирання електричного ланцюга.

7. Розбирати електричний ланцюг, а також переходити до складання нового можна лише за дозволом викладача.

8. Якщо при дослідженні ланцюга постійного струму стрілка вимірювального приладу іде за межі шкали в зворотному напрямку, треба відключити ланцюг і перемкнути підходящі до приладу дроти.

9. Якщо стрілка якого-небудь приладу виходить за межі шкали, треба негайно вимкнути джерело живлення, доповісти викладачеві або лаборанту.

10. Лабораторна робота вважається виконаною тільки після затвердження її результатів викладачем і приведення робочого місця в порядок.

11. Під час занять в лабораторії студенти зобов'язані перебувати на своїх робочих місцях. Виходити з приміщення лабораторії під час заняття можна тільки з дозволу викладача.

Обробка результатів та оформлення звіту. Складання звіту про проведені дослідження є найважливішим етапом виконання лабораторної роботи. По кожній виконаній роботі кожен студент складає звіт, керуючись наступними положеннями.

1. Звіт з лабораторної роботи виконується відповідно до вимог і стандартів НТУ «ХП».

2. Звіт включає в себе розділи, що відображають всі етапи виконання роботи.

2.1. На титульному аркуші зазначаються назва навчального закладу, кафедри, порядковий номер та найменування лабораторної роботи, прізвище та ініціали студента, який виконав роботу, номер його академічної групи, дата виконання роботи.

2.2. Мета роботи, яка відображає основні завдання теоретичного та експериментально плану, які вирішуються в даній роботі.

2.3. Розрахункове завдання, яке виконується перед лабораторною роботою і є одним з основних елементів допуску до виконання лабораторної роботи.

2.4. Експериментальна частина, яка включає в себе електричні схеми та результати досліджень, зведені в таблиці. Кожен етап або дослідження повинні мати свій підзаголовок.

2.5. Обробка результатів експерименту. Наводяться таблиці результатів розрахунків за експериментальними результатами, розрахункові співвідношення, за якими робилися ці розрахунки, побудовані за результатами експериментів і розрахунків графіки, діаграми.

2.6. Звіт повинен містити основні висновки, відповідні цілі лабораторної роботи. За вказівкою викладача в звіті даються відповіді на контрольні питання керівництва.

3. Графічна частина звіту (схеми, таблиці, графіки) виконуються олівцем із застосуванням відповідних креслярських інструментів.

3.1. Принципові схеми викреслюються відповідно до вимог діючих стандартів. У місцях електричних з'єднань (вузлах) ставиться крапка.

3.2. Векторні діаграми будуються в масштабі з дотриманням величин кутів і зазначенням масштабу.

3.3. При побудові графіків слід пам'ятати, що, так як завданням лабораторних досліджень є з'ясування загальних закономірностей, то усі шкали графіків повинні починатися з нуля. На осях графіків дається зазвичай рівномірна шкала з круглими значеннями оцифрованих поділок. При необхідності одна з шкал може мати логарифмічний характер. При кресленні графіків треба враховувати, що будь-яке вимірювання має випадкові похибки. При цьому не слід проводити криві через всі експериментальні точки, на робочому полі вказуються експериментальні точки, за якими будується плавна безперервна крива, яка проходить серед експериментальних точок. Якщо в одних координатних осях будують кілька графіків функцій однієї незалежної змінної, то слід провести додаткові шкали паралельно основній поза основного поля. При побудові графіків вздовж осі абсцис у обраному масштабі відкладають незалежну змінну. Умовне буквене позначення цієї величини рекомендується ставити під віссю, а найменування одиниць виміру чи їх десяткових кратних або часткових одиниць - після позначення величини. Уздовж осі ординат масштабні цифри ставлять зліва від осі, найменування або умовне позначення величин, що відкладаються, - також зліва від осі і під цим позначенням вказують одиницю виміру. Найменування одиниць вимірювань дається без дужок.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

СТРІЛОЧНІ Й ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Мета роботи – вивчення й розшифрування позначень, що наносяться на шкалу електровимірювального приладу, вивчення устрою вольтметра й практичне ознайомлення з ним.

1.1 Загальні відомості

1.1.1 Вимірювальні механізми

Кожний вимірювальний механізм має одну або кілька обмоток, по яких при включенні приладу в електричне коло йде струм. Струм створює в навколишньому просторі магнітне поле. Крім обмоток, вимірювальний механізм має постійний магніт або сердечник, який намагнічується, коли по обмотках іде струм. Магнітне поле струму й магнітне поле, створюване сердечником, взаємодіють один з одним, внаслідок чого вказівна стрілка відхиляється. Стрілка приладів, у яких відсутній сердечник, але є дві обмотки, відхиляється в результаті взаємодії магнітних полів, створюваних минаючими по обмотках струмами. Залежно від виду такої взаємодії розрізняють системи вимірювальних механізмів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, індукційну.

Магнітоелектрична система зображена на рисунку 1.1. Принцип дії - взаємодія магнітного поля струму, що проходить по обмотці рамки, з магнітним полем постійного магніту.

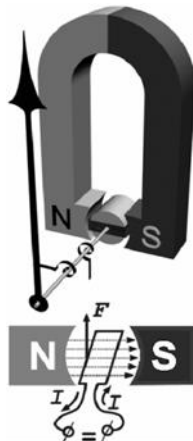


Рис. 1.1 - Вимірювальний механізм магнітоелектричної системи і його схема

Струм до обмотки рамки йде по двом спіральним пружинам. Коли по обмотці рамки йде струм, вона повертається на кут, величина якого

пропорційна вимірюваному струму (напрузі). Напрямок повороту рамки, а виходить, і стрілки залежить від напрямку струму в обмотці рамки.

Основні переваги: висока точність; рівномірність шкали; незалежність точності показань від дії зовнішніх магнітних полів.

Основні недоліки: неможливість вимірювати тим самим приладом постійний і змінний струми (якщо в приладі немає випрямного обладнання); порівняно висока вартість.

Електромагнітна система зображена на рисунку 1.2. Принцип дії - взаємодія магнітного поля струму, що проходить по обмотці котушки, з магнітним полем сердечника, що піддається намагнічуванню. Внаслідок цієї взаємодії феромагнітний (здатний добре намагнічуватися), сердечник втягується усередину котушки, завдяки чому відхиляється вказівна стрілка.

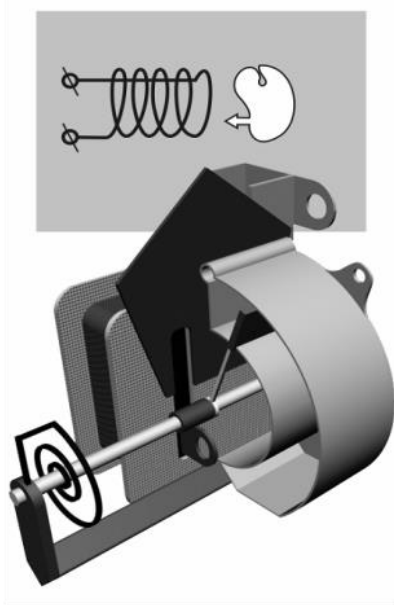


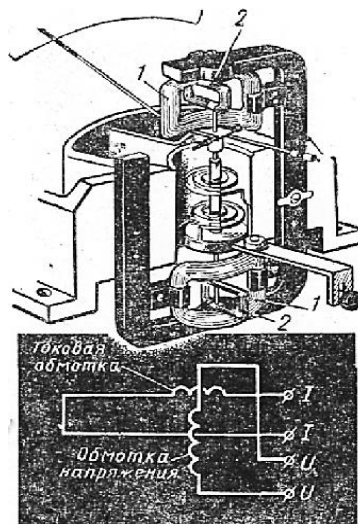
Рис. 1.2 - Вимірювальний механізм електромагнітної системи і його схема

При зміні напрямку струму в обмотці одночасно змінюється полярність сердечника, що намагнічується. Тому при будь-якому напрямку струму в обмотці сердечник втягується усередину, а стрілка, отже, відхиляється в ту саму сторону.

Основні переваги: простота обладнання; відносно невисока вартість; придатність для виміру постійного й змінного струму; стійкість до перевантажень.

Основні недоліки: невисока точність; нерівномірність шкали; залежність точності показань від впливу зовнішніх магнітних полів; порівняно більша потреба в електроенергії.

Електродинамічна система зображена на рисунку 1.3. Принцип дії - взаємодія магнітних полів струмів, що протікають по двом обмоткам, одна з яких нерухлива, а інша може обертатися.



- 1 - струмова обмотка (нерухлива);
2 - обмотка напруги (рухлива)

Рис. 1.3 - Вимірювальний механізм електродинамічної системи і його схема

Обмотка нерухливої котушки називається струмовою обмоткою. Вона має мало витків і включається в ланцюг послідовно.

Обмотка рухливої котушки має багато витків, включається в ланцюг паралельно й називається обмоткою напруги. При включенні приладу в ланцюг струм одночасно проходить по обмотках обох котушок. У результаті взаємодії магнітних полів струмів рухлива котушка повертається на кут, пропорційний добутку струмів. Напрямок струму в обмотках може змінюватися лише одночасно.

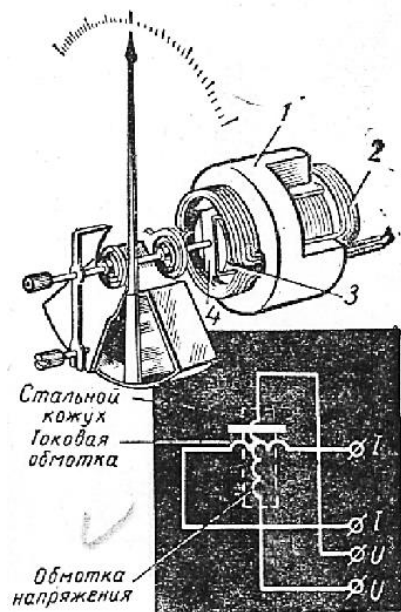
Тому незалежно від напрямку струму рухлива котушка, а виходить, і стрілка повертаються тільки в одну сторону. Механізм електродинамічної системи застосовується в амперметрах, вольтметрах і ватметрах.

Поряд з вимірювальними механізмами електродинамічної системи широко застосовуються механізми феродинамічної системи. Принцип дії механізмів цих систем однаковий. Конструкція феродинамічного механізму (рис. 1.4) відрізняється тим, що його нерухлива обмотка поміщена на магнітопроводі, завдяки чому підвищується чутливість приладу.

Основні переваги: висока точність; можливість виміру тим самим приладом постійного й змінного струму.

Основні недоліки: порівняно висока вартість, точність показань погіршується під впливом зовнішніх магнітних полів (особливо в електродинамічних); порівняно мала стійкість до перевантажень.

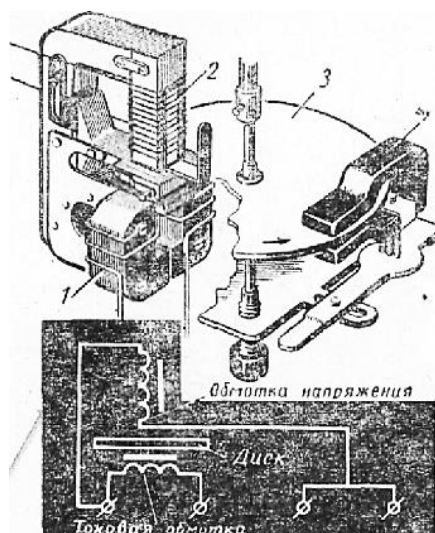
Індукційна система зображена на рисунку 1.5. Принцип дії - взаємодія магнітних полів струмів, що протікають по двом обмоткам, з магнітним полем струму, що індукується в алюмінієвому диску, який перебуває між цими обмотками.



- 1 - сталевий кожух; 2 - струмова обмотка;
3 - сталевий циліндр; 4 - обмотка напруги

Рис. 1.4 - Вимірювальний механізм феродинамічної системи і його схема

Механізми індукційної системи звичайно застосовують в інтегрованих приладах. Тому вісь, на якій укріплений диск, через систему передач з'єднують не зі стрілкою, а з рахунковим механізмом. Такий механізм застосовується в обладнанні лічильників електроенергії.



- 1 - струмова обмотка; 2 - обмотка напруги;
3 - алюмінієвий диск; 4 - постійний магніт (заспокоювач)

Рис. 1.5 - Вимірювальний механізм індукційної системи і його схема

1.1.2 Умовні графічні позначення на шкалі

Шкала приладу служить для відліку значення вимірюваної величини.

Крім того, на шкалі за допомогою умовних знаків дається докладна технічна характеристика приладу, знати яку необхідно для правильного вибору й застосування приладу.

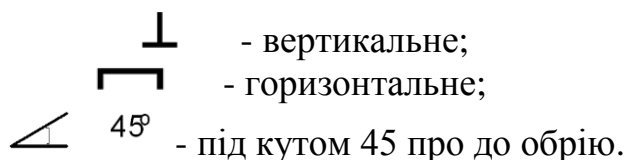
На шкалі приладу вказують рід вимірюваного струму (постійний, змінний), систему вимірювального механізму (див. нижче), клас точності (цифри, що позначають клас точності, іноді обводять окружністю).

Кожний прилад розрахований на певні умови експлуатації, що також вказують на шкалі. Ступінь захищеності від зовнішніх магнітних полів позначають римськими цифрами I, II, III, IV. Менша цифра відповідно означає, що прилад краще захищений від дії зовнішніх магнітних полів.

Умови роботи приладу при відповідних температурі й вологості позначаються на шкалі буквами:

- А - нормально працює при температурі навколишнього повітря від +10 до +35°C і відносної вологості до 80%;
- Б - нормально працює при температурі навколишнього повітря від -20 до +50°C і відносної вологості до 80%;
- В - нормально працює при температурі навколишнього повітря від -40 до +60°C і відносної вологості до 98%.

Під час роботи прилад повинен бути розташований так, як зазначено на його шкалі:



Позначення типів систем:



На шкалі приладу зазначена величина напруги, при якій була випробувана електрична міцність ізоляції (рис. 1.6), а також марка заводу- виробника, заводський номер, рік випуску й тип приладу.



Рис. 1.6 - Умовні позначки величини напруги, при якій випробувана ізоляція

1.2 Порядок виконання роботи

1.2.1 Устаткування робочого місця

Роботу виконують на лабораторному столі, де встановлюють досліджувані вимірювальні прилади з інструкцією, складеної відповідно до його технічного опису.

1.2.2 Порядок дій

1. Одержати у викладача електровимірювальні прилади.
2. Вивчити технічні характеристики приладів по нанесених на них умовним позначкам і заповнити таблицю 1.1.
3. У таблицю 1.1 заносять умовні позначки (символи), наявні на шкалі приладу, а потім дають їхнє письмове розшифрування.

Таблиця 1.1 – Характеристики досліджуваних приладів

Тип, марка	Межа виміру	Вид струму	Система	Клас точності	Умови експлуатації	Положення	Напруга ізоляції	Заводський номер	Інше

4. Накреслити шкалу електромеханічного вимірювального приладу із вказівкою оцифрованих точок і відградувати її для нових меж вимірів.
5. Провести вимір напруги елемента живлення за допомогою цифрового вольтметра, показання занести у звіт.
6. Скласти звіт за встановленою формою.

1.3 Контрольні питання

1. Прилади магнітоелектричної системи, їх переваги й недоліки.
2. Прилади електромагнітної системи, їх переваги й недоліки.
3. Чим відрізняються прилади феродинамічної системи від приладів електродинамічної системи?

4. Прилади яких систем стійкі до впливів зовнішніх магнітних полів?
5. Коли використовуються прилади індукційної системи?
6. Характеристики цифрового вольтметра.
7. Додаткові функції цифрових мультиметрів.
8. Точність виміру цифрових приладів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ. ПОСЛІДОВНЕ ТА ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ОПОРІВ

Мета роботи – вивчення основних законів постійного електричного струму, експериментальна перевірка закономірностей електричного кола при послідовному і паралельному з'єднанні опорів.

2.1 Загальні відомості

2.1.1 Електричний струм

Електричним струмом називається всякий впорядкований рух електричних зарядів. Лінії, уздовж яких рухаються заряджені частинки, називаються лініями струму. За направлення електричного струму беруть напрям руху позитивних електричних зарядів. Насправді в металевих провідниках електричний струм створюється рухом електронів в напрямку зворотному напрямку струму. Впорядкований рух електричних зарядів може бути здійснено шляхом переміщення в просторі зарядженого тіла (провідника або діелектрика). Такий струм називається конвекційним. Наприклад, струм, пов'язаний з рухом по орбіті Землі, що володіє надлишковим негативним зарядом. Мікроскопічні електричні заряди можуть рухатися впорядковано в вакуумі незалежно від макроскопічних тіл. Такий спрямований рух зарядів називають струмом в вакуумі. Прикладом можуть служити потоки електронів в електронопромених трубках осцилографів, в кінескопах телевізорів. Впорядкований рух електричних зарядів всередині макроскопічного тіла (твердого, рідкого або газоподібного) під дією електричного поля називається струмом провідності. Для появи електричного струму провідності необхідні дві умови:

– наявність в даному середовищі вільних зарядів, які могли б у ній переміщатися (такими зарядами в металах, є електрони; в рідких провідниках - позитивні і негативні іони; в газах - позитивні іони і електрони);

– наявність в даному середовищі електричного поля, енергія якого витрачається на переміщення вільних електричних зарядів.

Для того, щоб в ланцюзі існував би тривалий час струм необхідний пристрій, в якому будь-який вид енергії безперервно перетворювався б у

енергію електричного поля. Такий пристрій називається джерелом електрорушійної сили, або джерелом струму. Для характеристики електричного струму вводиться поняття сили струму. Силою струму називається скалярна величина, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (2.1)$$

де dq – електричний заряд, що проходить крізь поперечний переріз провідника за час dt .

Якщо сила струму і його напрям не змінюються з плином часу, то струм називається постійним. В цьому випадку сила струму:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (2.2)$$

де q – електричний заряд, що проходить за час t через поперечний переріз провідника. Одиниця сили струму в системі СІ - ампер (А). Він визначається на підставі електромагнітної взаємодії двох паралельних прямолінійних постійних струмів. З формули (2.2) випливає, що якщо сила струму дорівнює одному амперу, то через поперечний переріз провідника за одну секунду протікає заряд рівний одному кулону. Для характеристики розподілу електричного струму по перетину провідника вводиться вектор щільності струму. Напрямок вектора збігається з напрямком струму і по модулю дорівнює силі струму в розрахунку на одиницю площі поперечного перерізу провідника, перпендикулярної до ліній струму:

$$j = \frac{dI}{dS}, \quad (2.3)$$

де dI – сила струму через елементарну площадку dS , розташовану перпендикулярно до напрямку вектору \vec{j} . Щільність струму в системі СІ вимірюється в А/м².

З (2.3) виходить, що повна сила струму у провіднику дорівнює:

$$I = \int_S j dS. \quad (2.4)$$

Якщо площадка dS не перпендикулярна до \vec{j} , то у цьому разі замість j необхідно брати складову щільності струму $j_n = j \cos \alpha$, перпендикулярну до dS . У співвідношенні α - кут між вектором \vec{j} і нормаллю до площадки dS .

Досліди показали, що щільність постійного струму однакова за всім поперечним перерізом S однорідного провідника. Тому для постійного струму:

$$I = jS. \quad (2.5)$$

У ланцюзі постійного струму, що складається з провідників зі змінною площею поперечного перерізу, щільності струмів в різних перетинах S_1 і S_2 обернено пропорційні площам цих перерізів:

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{S_2}{S_1}. \quad (2.6)$$

Електрони провідності в металі, іони в електроліті, іони і електрони в газі, тобто всі заряджені частинки, що містяться в різних тілах, скоюють хаотичний (тепловий) рух.

Електричне поле \vec{E} в речовині надає всім вільним зарядженим частинкам додаткову швидкість упорядкованого руху, який і зумовлює струм. Середня швидкість упорядкованого руху u в твердих і рідких тілах зазвичай досить мала в порівнянні зі швидкістю теплового руху. Вона становить 10^{-1} - 10^{-3} см/с. Таким чином, в ланцюзі постійного струму електрони рухаються вздовж провідника досить повільно.

Однак ця швидкість упорядкованого руху не має ніякого відношення до швидкості поширення струму в провіднику. Коли на електростанції включається рубильник, струм в квартирі з'являється в момент приходу електромагнітної хвилі, яка розповсюджується вздовж проводів зі швидкістю v , яка дорівнює швидкості світла в середовищі:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (2.7)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, ϵ – діелектрична проникність середовища, μ – магнітна проникність середовища.

Швидкість цієї хвилі і є швидкістю поширення струму в провіднику.

Виділимо всередині провідника площадку dS перпендикулярну u . Побудуємо на цій площадці, як на основі прямий циліндр з висотою рівною $u dt$ (рис. 2.1). Тоді число частинок, які пройдуть через розглянуту площадку за час dt , буде дорівнює числу частинок всередині циліндра.

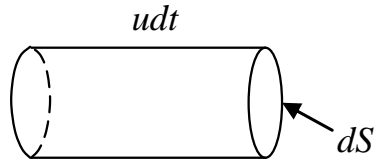


Рис. 2.1 – Елементарна частинка провідника

Якщо e - заряд носія струму, n - концентрація заряджених частинок (число частинок в одиниці об'єму), то число частинок усередині циліндра одно, а заряд, що переноситься через площадку dS , буде рівний $q = enudtdS$.

Тому величина щільності струму

$$j = \frac{dq}{dtdS} = enu \quad (2.8)$$

Так як e і n скалярні величини, а скорість \vec{u} вектор, то

$$\vec{j} = en\vec{u} \quad (2.9)$$

2.1.2 Електрорушійна сила

Якщо в провіднику створити електричне поле і не вжити заходів для його підтримки, то переміщення зарядів дуже швидко призведе до того, що поле всередині провідника зникне і струм припиниться. Для того, щоб підтримувати струм досить тривалий час, потрібно від кінця провідника з меншим потенціалом φ_2 (носії заряду вважаються позитивними) безперервно переносити заряди до кінця провідника з великим потенціалом φ_1 (рис. 2.2).

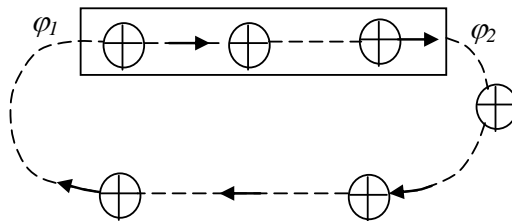


Рис. 2.2 – Схематичне зображення переносу носіїв

Переміщення зарядів в напрямку від меншого потенціалу до більшого, тобто проти сил електричного поля, можливо лише за допомогою сил неелектростатичного походження, які називають сторонніми силами. Це

можуть бути сили вихрового електричного поля, породжуваного змінним магнітним полем; хімічні процеси в акумуляторах і гальванічних елементах та інші.

Сторонні сили можна охарактеризувати роботою, яку вони здійснюють над зарядами, що переміщуються по ланцюгу. Електрорушійна сила (ЕРС), що діє в електричному ланцюзі або на його ділянці, чисельно дорівнює роботі сторонніх сил при переміщенні по електричному ланцюгу або по його ділянці одиничного позитивного заряду.

Отже, якщо робота сторонніх сил над зарядом q дорівнює A_{cm} , то ЕРС дорівнює

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}. \quad (2.10)$$

ЕРС измеряется в тех же единицах, что и потенциал, а именно, в вольтах.

Сторонняя сила

$$\vec{F}_{cm} = q\vec{E}^* \quad (2.11)$$

Векторну величину \vec{E}^* називають напруженістю поля сторонніх сил. Роботу сторонніх сил над зарядом q на всьому протязі замкнутого ланцюга можна представити таким чином:

$$A = \oint \vec{F}_{cm} d\vec{l} = \oint q\vec{E}^* d\vec{l}. \quad (2.12)$$

Розділивши цю роботу на q , отримаємо ЕРС, що діє в колі

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E}^* d\vec{l}. \quad (2.13)$$

Таким чином, ЕРС, що діє у замкнутому колі, може бути визначена як циркуляція вектора напруженості поля сторонніх сил.

Електрорушійна сила, що діє на ділянці кола 1-2, дорівнює

$$\mathcal{E}_{1,2} = \int_1^2 E^* dl \quad (2.14)$$

Крім сторонніх сил на заряд діють сили електростатичного поля $\vec{F}_e = q\vec{E}$. Отже, результуюча сила, що діє в кожній точці ланцюга на заряд q , дорівнює

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_{cm} = q(\vec{E} + \vec{E}^*). \quad (2.15)$$

Работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке 1-2, даётся выражением

$$A = q \int_1^2 \vec{E}^* d\vec{l} + q \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = q\mathcal{E}_{1,2} + q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (2.16)$$

При виведенні формули (2.16) ми користувалися тим, що на ділянці кола 1-2 напруженість поля $E = -\frac{d\varphi}{dl}$.

Величина, котра чисельно дорівнює роботі, яку здійснюють електростатичні і сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду, називається падінням напруги або напругою U на даній ділянці ланцюга

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{1,2} \quad (2.17)$$

За відсутності сторонніх сил, тобто коли $\mathcal{E}_{1,2} = 0$, напруга U співпадає з різницею потенціалів $\varphi_1 - \varphi_2$.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

2.1.3 Закон Ома в інтегральній формі

Експериментально встановлено, що сила струму в провіднику пропорційна падінню напруги U і обернено пропорційна опорі провідника R

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.18)$$

Якщо ділянка ланцюга не містить ЕРС (рис. 2.3), то така ділянка ланцюга називається однорідною і закон Ома для неї буде мати вигляд:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad (2.19)$$

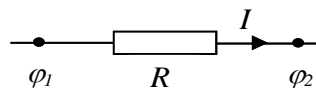


Рис. 2.3 – Закон Ома для однорідної ділянки ланцюга

Ділянка ланцюга, що має ЕРС, називається неоднорідною (рис. 2.4) і для неї закон Ома має вигляд:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{1,2}}{R + r}, \quad (2.20)$$

де R – опір зовнішньої ділянки електричного ланцюга, r – опір джерела ЕРС.

Якщо електричне коло замкнене (рис. 2.5), то $\varphi_1 = \varphi_2$. Тоді

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (2.21)$$

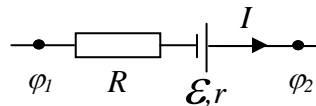


Рис. 2.4 – Закон Ома для неоднорідної ділянки ланцюга

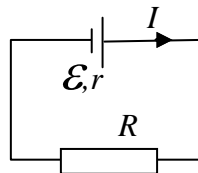


Рис. 2.5 – Закон Ома для замкненого електричного ланцюга

Величина опору залежить від форми й розмірів провідника, а так само від властивостей матеріалу, з якого він виготовлений. Для однорідного циліндричного провідника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.22)$$

де l – довжина провідника, S – площа його поперечного перерізу, ρ – питомий електричний опір матеріалу.

Значення питомого опору матеріалу ρ залежить від природи матеріалу й температури провідників. Для чистих металів при кімнатній температурі й вище питомий опір ρ лінійно збільшується з температурою $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, де α – температурний коефіцієнт опору, t – температура, ρ_0 – питомий опір провідника при 0°C . Для порівняння відзначимо, що опір напівпровідників зменшується при нагріванні.

2.1.4 Закон Ома у диференціальній формі

Знайдемо зв'язок між вектором щільності струму \vec{j} й напруженістю поля \vec{E} в деякій крапці M ізотропного провідника (рис. 2.6).

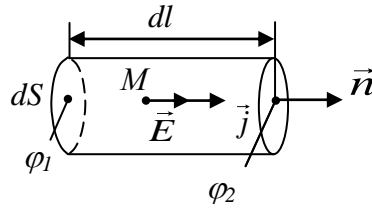


Рис 2.6 – Ділянка ізотропного провідника

Для цього виділимо в околиці цієї точки елементарний об'єм у вигляді прямого циліндра, що утворюється паралельно вектору \vec{j} .

Позитивні носії заряду в кожній крапці ізотропного провідника рухаються в напрямку вектора \vec{E} .

Сила струму в елементарному об'ємі $I = jdS$, опір цього об'єму $R = \rho \frac{dl}{dS}$.

Напругу в елементарному об'ємі можна розрахувати по формулі $U = Edl$, тому що усередині цього об'єму поле однорідне. Використовуючи закон Ома (2.18), одержимо

$$I = \frac{U}{R} = jdS = \frac{l}{\rho} EdS.$$

Отже, для щільності струму j будемо мати:

$$j = \frac{l}{\rho} E.$$

У векторній формі

$$\vec{j} = \frac{l}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}, \quad (2.23)$$

де $\sigma = \frac{l}{\rho}$ називається питомою електричною провідністю.

Формула (2.23) виражає собою закон Ома в диференціальній формі.

Для неоднорідної ділянки ланцюга, тобто при наявності на ділянці сторонніх сил, закон Ома в диференціальній формі прийме наступний вид:

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{E}^*), \quad (2.24)$$

де \vec{E}^* – напруженість поля сторонніх сил.

2.1.5 Закони Джоуля – Ленца

При проходженні по провіднику струму, провідник нагрівається. Джоуль і, незалежно від нього, Ленц виявили експериментально, що кількість тепла, що виділяється в провіднику, пропорційно його опору, квадрату сили струму й часу

$$Q = RI^2t. \quad (2.25)$$

Якщо сила струму змінюється з часом, то

$$Q = \int_0^t RI^2 dt. \quad (2.26)$$

Нагрівання провідника відбувається за рахунок роботи, чиненої силами поля над носіями струму.

Скориставшись законом Ома (2.18) для Q можна одержати наступне співвідношення:

$$Q = \int_0^t IU dt = \int_0^t \frac{U^2}{R} dt. \quad (2.27)$$

Потужність струму

$$N = \frac{dQ}{dt} = I^2 R = UI = \frac{U^2}{R}. \quad (5.4)$$

2.1.6 Послідовне та паралельне з'єднання опорів

Послідовним з'єднанням опорів називається таке з'єднання, при якому кінець першого опору з'єднується з початком другого, кінець другого - з початком третього і т.д (рис. 2.7).

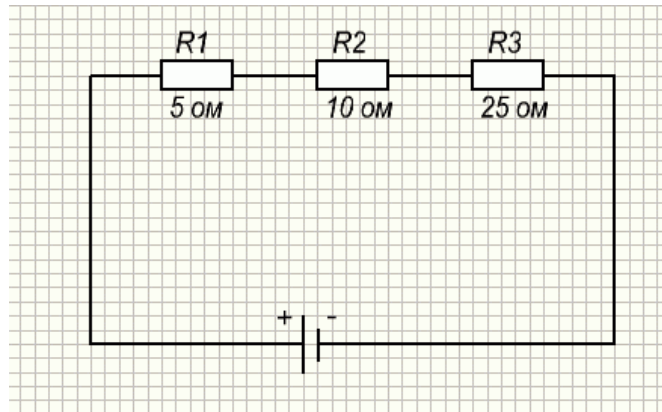
Загальний опір послідовно з'єднаних опорів дорівнює сумі їх опорів:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 ;$$
$$R_{\text{общ}} = 50\text{Ом} + 100\text{Ом} + 250\text{Ом} = 400\text{Ом}.$$

Тому що в даному ланцюзі відсутнє відгалуження струму, то очевидно, що кількість електрики, що протікає через поперечний переріз провідника за одиницю часу в будь-якій крапці ланцюга буде однаковою.

Отже, у всіх крапках послідовного ланцюга величина струму однакова.

Чотири амперметри, зображені на рисунку 2.8, покажуть однакові величини струму. Тому при послідовному з'єднанні для виміру струму досить включати один амперметр на будь-якій ділянці ланцюга.



Рисю 2.7 – Послідовне з'єднання опорів

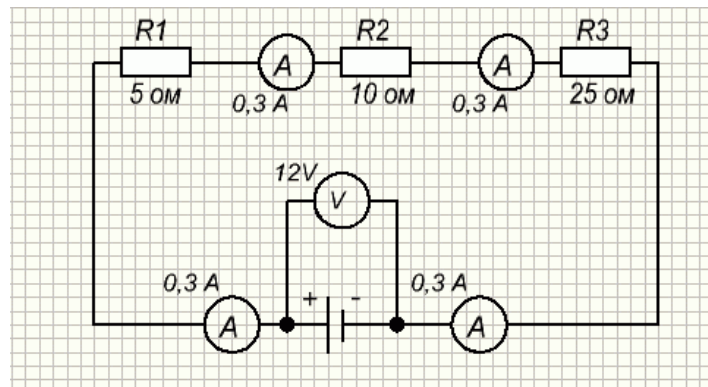


Рис. 2.8 – Вимір струму при послідовному з'єднанні опорів

Напруга джерела струму прикладена до зовнішньої ділянки ланцюга розподіляється по ділянках ланцюга прямо пропорційно опорам цих ділянок. Напруга, прикладена до кожного із цих резисторів визначається по формулі (рис 2.9):

$$U = I \cdot R$$

Тому що струм у послідовному ланцюзі скрізь однаковий значить дійсна напруга на її ділянках залежить від опору. Чим більше опір, тим більше напруга прикладена до даної ділянки.

Сума напруг на ділянках послідовного ланцюга дорівнює напрузі джерела струму

$$U = U_1 + U_2 + U_3;$$

$$12B = 1,5B + 3B + 7,5B.$$

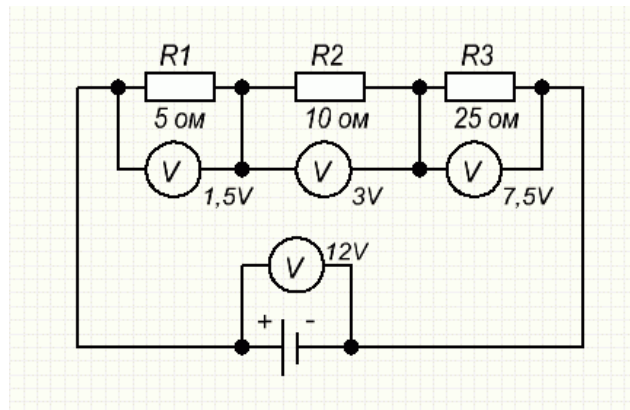


Рис. 2.9 – Розподіл напруги при послідовному з'єднанні опорів

Паралельним з'єднанням опорів називається таке з'єднання, при якому до одного затискачу джерела підключаються початки опорів, а до іншого затискача – кінці (рис. 2.10).

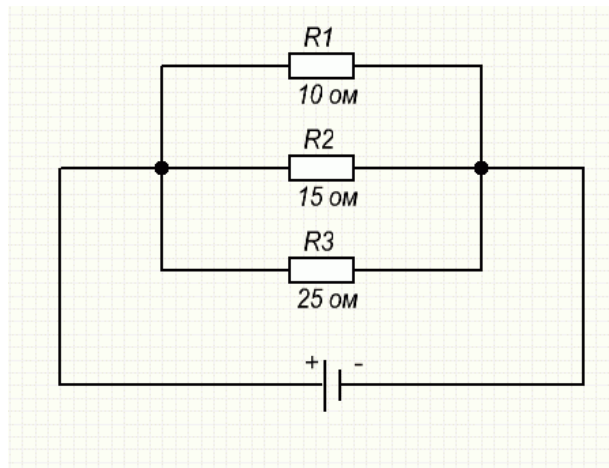


Рис. 2.10 – Паралельне з'єднання опорів

Загальний опір паралельний включених опорів визначається по формулі:

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Загальний опір паралельно включених опорів завжди менше найменшого опору, що входить у дане з'єднання. На рисунку 2.10 ми можемо відразу сказати, що загальний опір буде менше 10 Ом.

Перший окремий випадок: якщо паралельно включено тільки два резистори, то їх загальний опір можна визначити по формулі:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Другий окремий випадок: якщо паралельно включена будь-яка кількість резисторів однакових опорів, то їх загальний опір можна визначити, якщо опір одного резистора розділити на кількість резисторів.

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1}{n}.$$

Розподіл струмів і напруги в паралельних ланцюгах. Тому що початки всіх опорів зведені в одну загальну крапку, а кінці - в іншу, те очевидно, що різниця потенціалів на кінцях кожного з паралельно включених опорів дорівнює різниці потенціалів між загальними крапками (рис. 2.11).

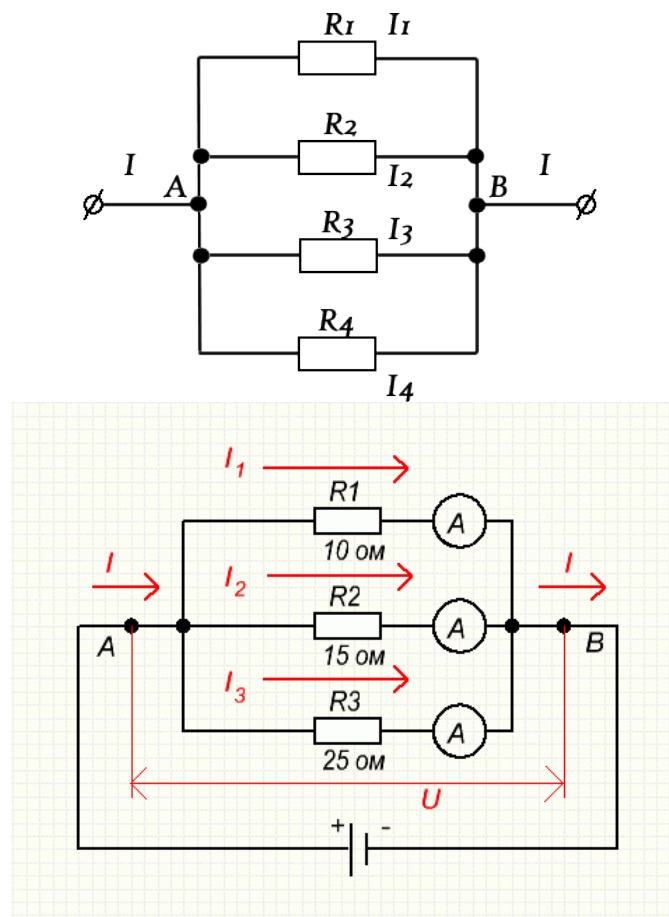


Рис 2.11 – Розподіл струму при паралельному з'єднанні опорів

Отже, при паралельному з'єднанні опорів напруги на них рівні між собою

$$U_1 = U_2 = U_3.$$

Якщо розгалуження підключене безпосередньо до затискачів джерела струму, то напруга на кожному з опорів дорівнює напрузі на затискачах джерела.

Друга властивість ланцюга з паралельним з'єднанням полягає в тому, що електричний струм розподіляється по паралельних гілках пропорційно їх опорам.

Це значить що, чим більше опір, тим менше по ньому піде струм

$$I = \frac{U}{R}.$$

Розглядаючи крапку розгалуження А, зауважуємо, що до неї притікає струм I , а струми I_1 , I_2 , I_3 витікають із неї. Тому що електричні заряди, які рухаються, не накопичуються в крапці, то очевидно, що сумарний заряд, що притікає до крапки розгалуження, дорівнює сумарному заряду, що витікає від неї:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Отже, третя властивість паралельного з'єднання може бути сформульована так: величина струму в нерозгалуженій частині ланцюга дорівнює сумі струмів у паралельних гілках.

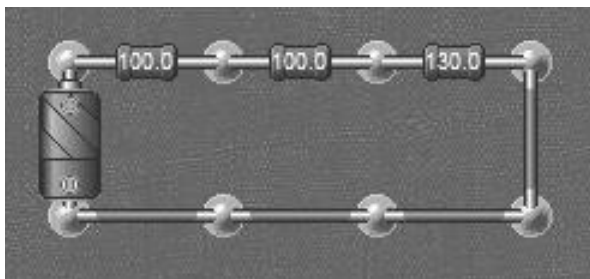
2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1 Устаткування робочого місця

Роботу виконують на лабораторному столі, де встановлюють плати з резисторами й вимірювальні прилади з інструкцією, складеної відповідно до їхнього технічного опису.

2.2.2 Порядок дій

1. Визначити й вивчити послідовне електричне коло.



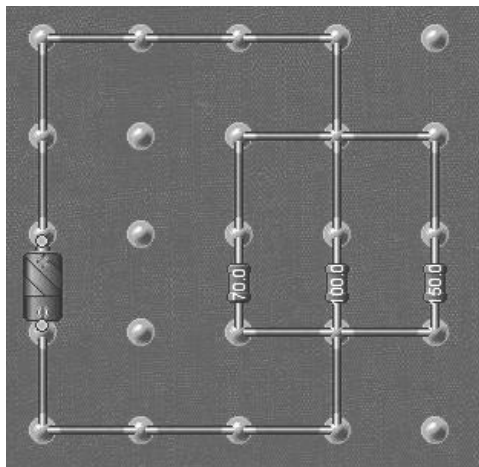
2. Зняти показання мультиметра в режимі виміру опору й записати їх у таблицю 2.1.

3. Здійснити розрахунки величини кожного опору за умови, що величини всіх опорів у ланцюзі однакові. Результати розрахунків занести в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати дослідження послідовного з'єднання опорів

$R_{\text{посл}}, \text{Ом}$	$R_1, R_2, R_3, \text{Ом}$

4. Визначити й вивчити паралельне електричне коло.



5. Зняти показання мультиметра в режимі виміру опору й записати їх у таблицю 2.2.

6. Здійснити розрахунки величини кожного опору за умови, що величини всіх опорів у ланцюзі однакові. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати дослідження паралельного з'єднання опорів

$R_{\text{пар}}, \text{Ом}$	$R_1, R_2, R_3, \text{Ом}$

2.3 Контрольні питання

1. Яке з'єднання резисторів називають послідовним?
2. Як визначити загальний опір резисторів при послідовному з'єднанні?
3. Що називається провідністю, і в яких одиницях вона вимірюється?
4. Чому рівний загальний струм ланцюга й напруга на ділянках при паралельному з'єднанні?
5. Як визначається потужність на ділянках ланцюга й усьому ланцюга при послідовному та паралельному з'єднанні?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

ЗМІННИЙ СТРУМ

Мета роботи – вивчення теоретичних основ та отримання практичних навичок проведення розрахунків змінного струму.

3.1 Загальні відомості

3.1.1 Визначення змінного струму

При дії в замкненому контурі змінної електрорушійної сили (ЕРС) у ньому виникає змінний струм. Сила такого змінного струму може бути не постійною в різних перетинах нерозгалуженого провідника. Цей відступ від основної вимоги, якій задовольняє постійний струм, обумовлений кінцевою швидкістю поширення електромагнітних полів. Однак відступ виявиться незначним, якщо сила струму й розподіл зарядів мало міняється за час τ , протягом якого електромагнітні збурювання пробігають відстань, що відокремлює найбільш віддалені частини розглянутої електричної системи. Струми, що підкоряються цій умові, називаються квазістаціонарними. Далі будуть розглядатися тільки такі струми. Для квазістаціонарних струмів у кожний даний момент виконується закон Кирхгофа.

При обертанні рамки в магнітному полі з кутовою швидкістю ω потік магнітної індукції Φ , що пронизує площину, обмежену контуром рамки, міняється з часом t за законом:

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t, \quad (3.1)$$

де Φ_0 - найбільше значення потоку через площину контуру.

Електрорушійна сила, що виникає при цьому в ланцюзі, виявиться рівною:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega\Phi_0 \sin \omega t \equiv \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (3.2)$$

Це буде найпростіший випадок змінної ЕРС, що змінюється з часом за синусоїдальним законом. Величина $\varepsilon_0 = \omega\Phi_0$ називається амплітудою ЕРС і представляє її найбільше значення.

Крім зовнішньої ЕРС ε у контурі буде діяти ЕРС самоіндукції, тому що сила струму в контурі змінюється. Нехай L – коефіцієнт самоіндукції розглянутого ланцюга. Електрорушійна сила самоіндукції, як відомо, дорівнює:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} \quad (3.3)$$

Сума ЕРС $\varepsilon + \varepsilon_{si}$ повинна рівнятися, за законом Кирхгофа, добутку опору контуру на силу струму в ньому

$$IR = \varepsilon + \varepsilon_{si} \quad (3.4)$$

Підставляючи у формулу (3.4) замість ε і ε_{si} їх значення за (3.2) і (3.3), одержимо:

$$RI + L \frac{dI}{dt} = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (3.5)$$

Це співвідношення являє собою диференціальне рівняння, що визначає силу струму I у контурі із заданою ЕРС $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$ і заданим коефіцієнтом самоіндукції L й опором R .

3.1.2 Ланцюг змінного струму

Ланцюг змінного струму, на відміну від ланцюга постійного струму, допускає послідовне включення конденсатора. Якщо обкладку конденсатора приєднати до джерела постійного струму, то в ланцюзі піде струм лише доти, поки на обкладках конденсатора не виникне різниця потенціалів, що компенсує ЕРС джерела. Якщо ж обкладки конденсатора приєднати до джерел змінної ЕРС, то вони безупинно будуть перезаряджатися, і в ланцюзі увесь час буде йти змінний струм.

Нехай до затискачів S (рис. 3.1) прикладена змінна ЕРС $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$. Ланцюг складається з послідовного з'єднаних ємності C , самоіндукції L (котушки) і омичного опору R (омічним опором інших проводів зневажаємо).

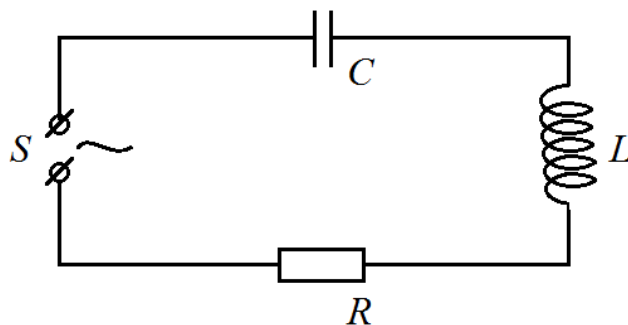


Рис. 3.1 – Приклад ланцюга змінного струму

Застосовуючи закон Кирхгофа до розглянутого ланцюга, за аналогією з (3.3)-(3.5) одержимо:

$$IR + V + L \frac{dI}{dt} = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (3.6)$$

де V - різниця потенціалів на обкладках конденсатора.

Різниця потенціалів на обкладках конденсатора V пов'язана із зарядом Q , зосередженим на обкладці конденсатора ємністю C , співвідношенням

$$Q = V \cdot C \quad (3.7)$$

За час dt заряд збільшиться на $dQ = Idt$, звідки в силу (3.7)

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt},$$

Або

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I \quad (3.8)$$

Диференціюючи рівність (3.6) за часом і враховуючи (3.8), одержимо:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = \varepsilon_0 \omega \cos \omega t \quad (3.9)$$

Розв'язок цього диференціального рівняння, якому повинна задовольняти сила струму I , будемо шукати у вигляді періодичної функції від часу того ж періоду, що й період ЕРС:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.10)$$

де I_0 й φ – постійні, які нам слід визначити. Становлячи першу й другу похідні від I за часом, одержимо:

$$\frac{dI}{dt} = I_0 \omega \cos(\omega t - \varphi); \quad \frac{d^2 I}{dt^2} = -I_0 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi).$$

Підставляючи ці похідні, а також (3.5) у рівняння (3.9), знайдемо:

$$RI_0 \cos(\omega t - \varphi) - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0 \sin(\omega t - \varphi) = \varepsilon_0 \cos \omega t \quad (3.11)$$

Представляючи $\cos(\omega t - \phi)$ й $\sin(\omega t - \phi)$ через синуси й косинуси від ωt і ϕ , одержимо:

$$RI_0 \cos \omega t \cos \phi + RI_0 \sin \omega t \sin \phi - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0 \sin \omega t \cos \phi + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0 \cos \omega t \sin \phi - \varepsilon_0 \cos \omega t = 0 \quad (3.12)$$

Тому що ця рівність повинна виконуватися для будь-якого моменту часу, то множники при $\sin \omega t$ й $\cos \omega t$ повинні в сумі рівнятися нулю, звідки одержимо два рівняння:

$$R \sin \phi - \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \cos \phi = 0; \quad (3.13)$$

$$R \cos \phi + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \sin \phi = \frac{\varepsilon_0}{I_0}. \quad (3.14)$$

З рівняння (3.13) одержуємо:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}. \quad (3.15)$$

Зводячи рівності (3.13) і (3.14) у квадрат і складаючи їх, знайдемо:

$$R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2 = \frac{\varepsilon_0^2}{I_0^2},$$

Звідки

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2}}. \quad (3.16)$$

Рівності (3.10), (3.15) і (3.16) дають нам шуканий розв'язок: у ланцюзі тече струм I того ж періоду, що й прикладена ЕРС; амплітуда цього струму I_0 визначається рівністю (3.16).

Струм I зміщений по фазі відносно ЕРС ε на кут ϕ , обумовлений рівністю (3.15). Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

носить характер повного опору (імпеданс), $L\omega$ – індуктивний опір й $\frac{1}{C\omega}$ – ємнісний опір, він залежить від значень R , L , C і від частоти струму ω . При ω , що задовольняє співвідношенню

$$L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0 \quad (3.17)$$

повний опір досягає мінімуму; при цій частоті амплітуда сили струму досягає максимального значення

$$I_{0\max} = \frac{\varepsilon_0}{R}.$$

Явище походження змінного струму через ланцюг з ємністю й самоіндукцією нагадує явище механічного резонансу: амплітуда сили струму залежить від частоти ω й досягає максимуму при деякому певному значенні $\omega_{\text{рез.}}$, котре називається резонансною частотою, значення якої, за (3.17), дорівнює

$$\omega_{\text{рез.}} = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (3.18)$$

По формулі (3.15) при резонансі різниця фаз $\phi = 0$.

При $\omega \rightarrow 0$ різниця фаз $\phi \rightarrow -\frac{\pi}{2}$, тобто струм випереджає значення ЕРС; при $\omega \rightarrow \infty$ різниця фаз $\phi \rightarrow +\frac{\pi}{2}$; у цьому випадку струм відстає від ЕРС. На рис. 3.2 крива 1 показує зміну сили струму із частотою, що задається ЕРС і постійних L і C ; крива 2 дає залежність ϕ від частоти.

3.1.3 Метод векторних діаграм

Явища в ланцюзі змінного струму з ємністю й самоіндукцією можуть бути представлені за допомогою векторної діаграми.

Для цього перепишемо рівняння (3.11) у вигляді:

$$RI_0 \sin\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right) - I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \sin(\omega t - \phi) = \varepsilon_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

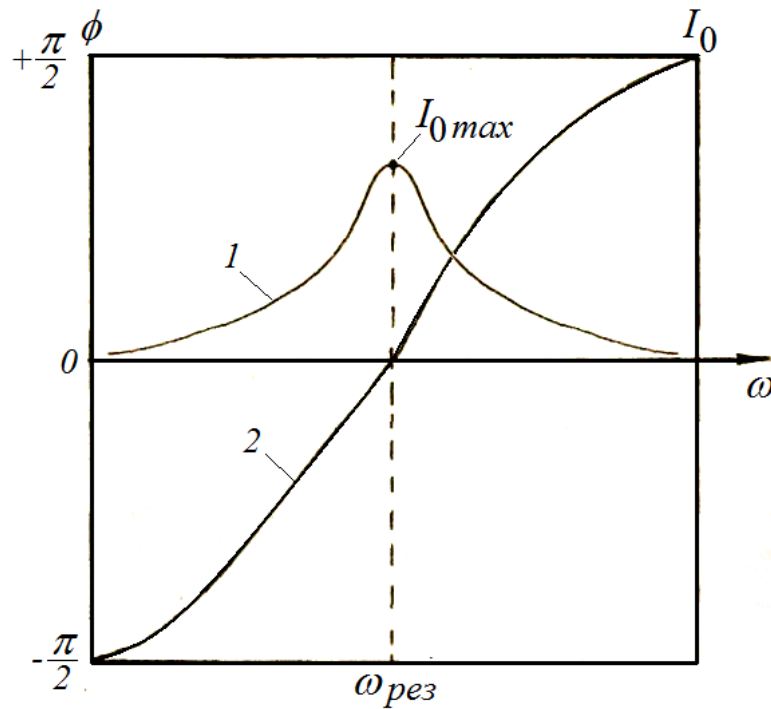


Рис. 3.2 - Залежність сили струму (1) і зрушення фаз (2) від частоти

Тому що істотна лише різниця фаз, а не самі початкові фази, та цю рівність можна замінити рівністю:

$$RI_0 \sin(\omega t - \phi) + I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \sin\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right) = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (3.19)$$

Обидва члени, що стоять у лівій частині цієї рівності, можна представити у вигляді взаємно перпендикулярних векторів амплітуд $\overline{RI_0}$ і $\overline{I_0 \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)}$, які складають з віссю ox відповідно кути $\omega t - \phi$ й $\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}$ (рис. 3.3).

Результуюча амплітуда зобразиться вектором $\overline{\varepsilon_0}$, довжина, якого визначиться рівністю:

$$\varepsilon_0^2 = R^2 I_0^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2 I_0^2,$$

звідки випливає формула (3.16). Як легко бачити, вектор $\overline{\varepsilon_0}$ становить із вектором $I_0 R$ кут ϕ . Очевидно, що рівність (3.19) виходить шляхом проектування векторної суми $\overline{\varepsilon_0} = \overline{I_0 R} + \overline{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) I_0}$ на вісь oy , що й обґрунтовує зручність методу векторних діаграм при аналізі ланцюгів змінного струму.

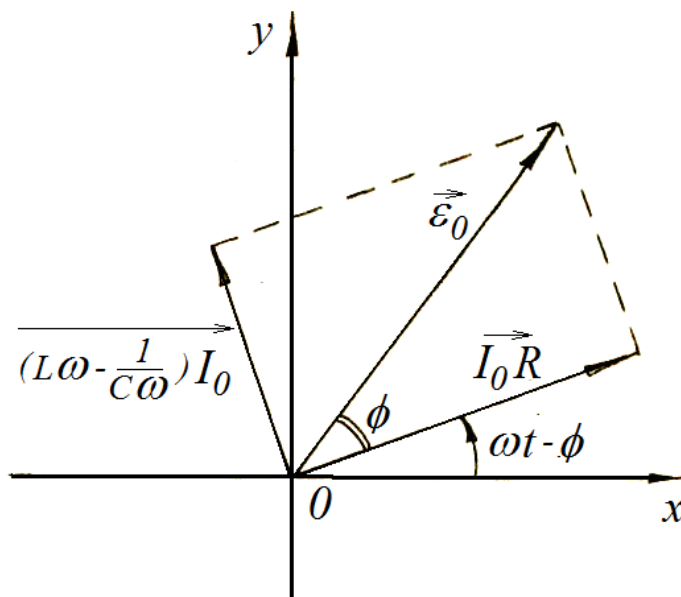


Рис. 3.3 - Векторна діаграма для ланцюга змінного струму із самоіндукцією і ємністю

Розглянемо тепер питання про потужність, що виділяється в ланцюзі змінного струму. Миттєве значення потужності ми одержимо, якщо оберемо добуток миттєвого значення сили струму на миттєве значення ЕРС:

$$\varepsilon I = W = \varepsilon_0 \sin \omega t \sin(\omega t - \phi) \cdot I_0. \quad (3.20)$$

У різні моменти часу це миттєве значення потужності має різну величину, зокрема, воно дорівнює нулю в ті моменти, коли дорівнює нулю I або ε . Тому нас буде цікавити не миттєве значення потужності, а середнє значення потужності за період. Щоб підрахувати це середнє значення, перетворимо вираження (3.20) для W в такий спосіб:

$$W = \varepsilon_0 I_0 \sin \omega t \sin(\omega t - \phi) = \frac{\varepsilon_0 I_0}{2} [\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)].$$

Таким чином, середнє значення W за період представляється сумою середніх значень членів

$$\frac{\varepsilon_0 I_0}{2} \cos \phi \text{ і } -\frac{\varepsilon_0 I_0}{2} \cos(2\omega t - \phi).$$

Перший член від часу не залежить; отже, його середнє значення дорівнює йому самому; другий член міняється з часом внаслідок зміни $\cos(2\omega t - \phi)$. Середнє значення $\cos(2\omega t - \phi)$ за період, мабуть, дорівнює нулю, тому що за період $\cos(2\omega t - \phi)$ отримує так само часто позитивні значення, як і рівні їм

негативні. У результаті середнє за період значення потужності, що виділяється в ланцюзі, буде дорівнювати:

$$\vec{W} = \frac{\varepsilon_0 I_0}{2} \cos \phi. \quad (3.21)$$

Уведемо позначення:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}; I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}. \quad (3.22)$$

Величини ε_{ef} й I_{ef} називаються ефективною ЕРС і ефективною силою струму; підставляючи їх у (3.21), одержимо для середнього за період значення потужності:

$$\vec{W} = \varepsilon_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad (3.23)$$

Якщо зрушення фаз між струмом і ЕРС дорівнює нулю, то середня потужність буде виражатися добутком ефективної сили струму на ефективну ЕРС. Таким чином, ефективні значення сили струму й ЕРС відіграють ту ж роль, що сила струму й ЕРС у випадку постійного струму.

Потужність, що розсіюється струмом, виділяється у вигляді тепла. Тому повна кількість тепла, що виділяється у всьому ланцюзі за час t , дорівнює

$$Q = \varepsilon_{ef} I_{ef} \cos \phi t \quad (3.24)$$

Використовуючи (3.22), а також (3.15)-(3.16), одержуємо, що

$$Q = I_{ef}^2 R t. \quad (3.25)$$

Звідки випливає, що кількість тепла, що виділяється в ланцюзі змінного струму з даним омичним опором R , виражається звичайною формулою Джоуля-Ленца, якщо тільки під силою струму мати на увазі ефективну силу струму.

3.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися із приладами й пристосуваннями для вивчення змінного струму.

2. Зібрати ланцюг для виміру омичного опору R індуктивного опору $L\omega$, ємнісного опору $\frac{1}{C\omega}$ й повного опору Z (імпедансу).

3. Побудувати відповідні векторні діаграми.
4. Досліджувати частотну залежність імпедансу $Z(\omega)$ в ланцюзі змінного струму.
5. Одержати резонанс у ланцюзі змінного струму і знайти резонансну частоту $\omega_{рез.}$.
6. Побудувати графік отриманої залежності.
7. Оцінити похибку вимірів.

3.3 Контрольні питання

1. Квазістаціонарність змінного струму.
2. Метод векторних діаграм.
3. Потужність у ланцюзі змінного струму.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

Мета роботи – дослідити зовнішні характеристики й визначити основні параметри однофазних випрямлячів. Зняти осцилограми струмів і напруг випрямляча, визначити ступінь відмінності їх від теоретичних.

4.1 Загальні відомості

Для живлення електронних пристроїв потрібна енергія постійного струму. Перетворення змінного струму в постійний здійснюється у випрямлячі. При аналізі роботи випрямних схем вентиля (діоди) і трансформатори вважаються ідеальними, тобто вважають що опір вентиля в прямому напрямку дорівнює нулю, а у зворотному нескінченно велике, втрати енергії в обмотках трансформатора не відбувається.

4.1.1 Однополуперіодна схема випрямляча

Однополуперіодна схема зображена на рис. 4.1, а, тимчасові діаграми, що пояснюють її роботу на активне навантаження - на рис. 4.1, б. Струм і напруга в навантаженні $i_o(\omega t)$ і $u_o(\omega t)$ мають пульсуючий характер. Основні електричні параметри однополуперіодної схеми випрямлення:

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \quad - \text{середнє значення випрямленої напруги};$$

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_2 = \frac{I_2}{1,57} \quad - \text{середнє значення випрямленого струму};$$

$$I_{\text{аmax}} = \pi I_0 \quad - \text{максимальний прямий струм вентиля};$$

$U_{обр\max} = \sqrt{2}U_2 = \pi U_0$ - максимальна зворотна напруга на вентилях;

$K_\pi = \frac{\pi}{2} = 1,57$ - коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги;

$P_T \approx 3,1P_0$ - типова потужність трансформатора.

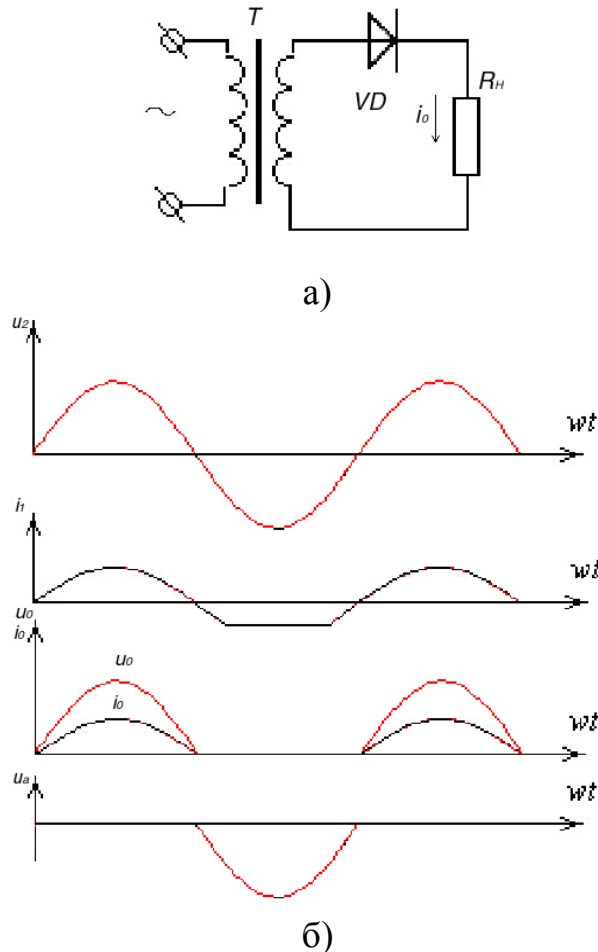


Рис. 4.1 - Однополуперіодна схема випрямлення (а) і часові діаграми при активному навантаженні (б)

Більші пульсації, низька частота основної гармоніки випрямленої напруги (рівна частоті мережі), більші розміри трансформатора, викликані неефективним використанням його обмоток і змушеним намагнічуванням сердечника постійною складовою випрямленого струму, а також велика зворотна напруга на вентилях є істотними недоліками цієї схеми, що обмежують її використання.

4.1.2 Двухполуперіодна схема випрямлення з нульовим виводом

Більш широке застосування одержали двухполуперіодні випрямлячі (див. рис. 4.2, а, б), схема яких є комбінацією двох однополуперіодних схем, що працюють на загальне навантаження. Вентилі відкриваються поперемінно на

половину періоду, тому крива напруги на навантаженні по величині й формі повторює позитивні півхвилі напруг u_{21} і u_{22} вторинних напівобмоток трансформатора.

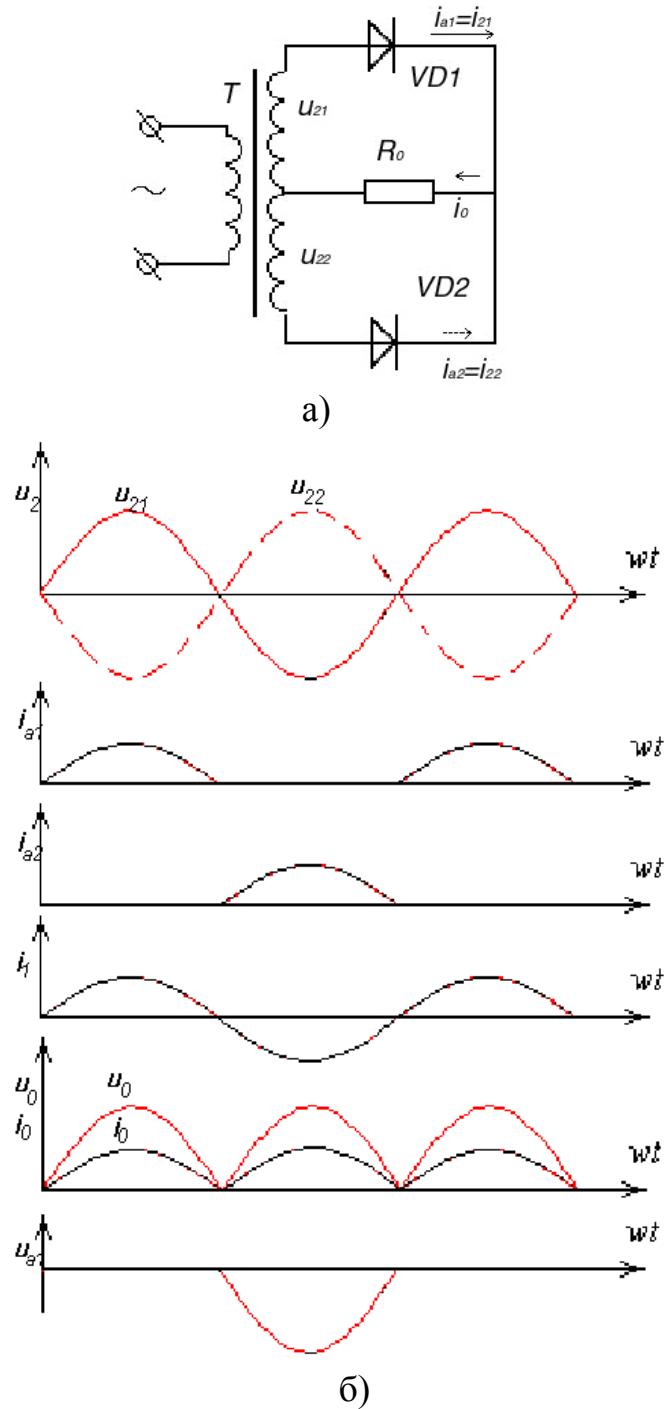


Рис. 4.2 - Двухполуперіодні випрямлячі (а) і часові діаграми при активному навантаженні (б)

Основні електричні параметри схеми:

$$U_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9U_2 ;$$

$$I_0 = \frac{4}{\pi} I_2 ;$$

$$I_{2\max} = \frac{\pi}{2} I_0 ;$$

$$U_{обр\max} = 2\sqrt{2}U_2 = \pi U_0 ;$$

$$K_n = 0,67 ;$$

$$P_T = 1,48 P_0 .$$

Зниження типової потужності й краще використання трансформатора пояснюється відсутністю змушеного намагнічування сердечника постійною складовою струму вторинної обмотки.

Середнє значення випрямленого струму й напруги у два рази більше, а пульсації значно менше, ніж у однополуперіодних випрямлячів.

Недолік двухполуперіодної схеми полягає в труднощах виготовлення трансформатора із двома симетричними напівобмотками.

Цього недоліку позбавлена мостова схема випрямлення (рис. 4.3, а).

4.1.3 Мостова схема випрямлення

Протягом першого півперіоду напруги u_2 вентиля VD1 і VD3 відкриті й у навантажувальному резисторі виникає струм i_0 . У цей час вентиля VD2 і VD4 закриті. В інший півперіод напруги вентиля VD1 і VD3 закриваються, а VD2 і VD4 відкриваються.

Струм по навантаженню протікає в тому ж напрямку, що й у перший півперіод.

Часові діаграми роботи мостового випрямляча мають той же вид, що й діаграми роботи двухполуперіодного випрямляча з нульовим виводом. Виключення становить залежність $u_a(\omega t)$, оскільки між анодом і катодом вентиля в неспроможному напрямку прикладена напруга вторинної обмотки трансформатора, тобто $U_{обр\max}$ зменшується у два рази:

$$U_{обр\max} = \sqrt{2}U_2 = \frac{\pi}{2}U_0 .$$

Типова потужність трансформатора в мостовій схемі менше, ніж в інших схемах:

$$P_T = P_1 = P_2 = 1,23 P_0 .$$

Величини випрямлених напруги і струму, а також коефіцієнта пульсацій мають ті ж значення, що й у двухполуперіодній схемі з нульовим виводом.

Через те, що коефіцієнт пульсацій напруги, що живить електронні пристрої, не повинен перевищувати $10^{-4} - 10^{-7}$, отриману безпосередньо з випрямляча напругу використовувати не можна. Для зменшення пульсацій

напруги застосовують фільтри, що згладжують, які складаються із конденсаторів і котушок індуктивності.

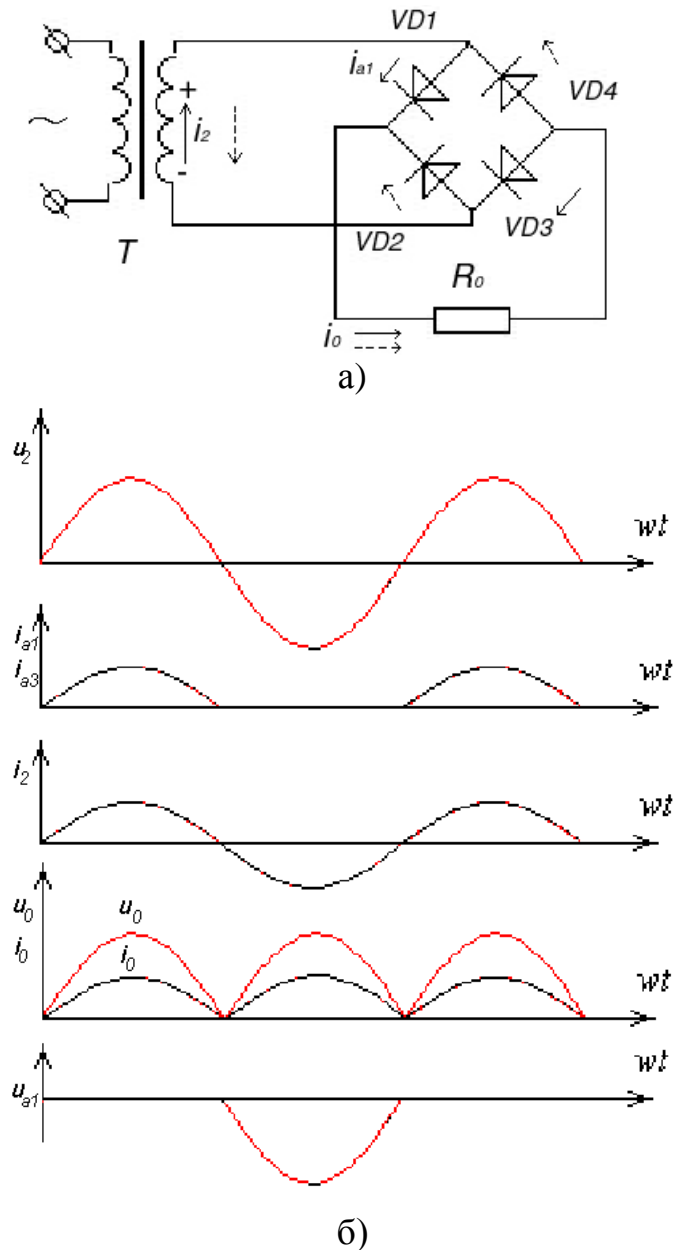


Рис. 4.3 - Мостова схема (а) і часові діаграми при ємнісному характері навантаження (б)

Часові діаграми, що пояснюють роботу мостового випрямляча на активно-ємнісне навантаження, наведені на рис. 4.3, б. Струм у вентилях $VD1$ і $VD3$ протікає в інтервалі часу t_1-t_2 , у результаті чого конденсатор заряджається до напруги, близької до U_{2m} . Протягом часу t_2-t_3 напруга $u_c > u_2$, усі вентиля закриті, а конденсатор розряджається через R_n з постійної часу $\tau_p = CR_n$. У момент часу t_3 напруга u_c стає менше u_2 , вентиля $VD2$ і $VD4$ відкриваються, конденсатор C починає заряджатися й процеси повторюються.

Середнє значення випрямленої напруги збільшується, але також зростає зворотна напруга на вентилях до величини

$$U_{обртах} \approx 2U_{2m}.$$

Розрахунки випрямляча, що працює на активно-ємнісне навантаження, є досить складним завданням. Однак у багатьох випадках його можна розв'язати шляхом прийняття ряду допущень. Основним допущенням, що спрощує, прийнятим при аналізі цих схем, є припущення нескінченно великої ємності конденсатора, включеного паралельно навантаженню, і як наслідок цього - незмінність у часі випрямленої напруги.

4.1.4 Схема подвоєння напруги

Схема подвоєння напруги наведена на рис. 4.4. Вона полягає як би із двох однополуперіодних випрямлячів, з'єднаних між собою послідовно й працюючих на загальне навантаження.

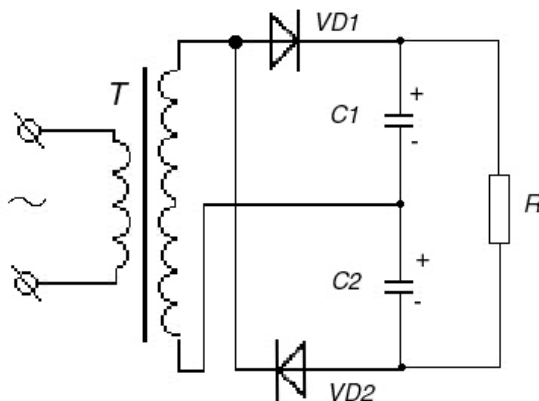


Рис. 4.4 - Схема подвоєння

Перший випрямляч складається з вентиля VD1 і конденсатора C1, другий - з вентиля VD2 і конденсатора C2. Протягом позитивного півперіоду C1 заряджається через вентиль VD1 до напруги U_{2m} . Тому що конденсатори C1 і C2 з'єднані послідовно, та напруги на них підсумуються й загальна напруга на виході випрямляча становитиме

$$U_0 = U_{c1} + U_{c2} = 2U_{2m}.$$

Зворотна напруга на кожному з вентилів дорівнює сумі амплітудного значення напруги й напруги на конденсаторі:

$$U_{обртах} = U_{2m} + U_{c1} \approx 2U_{2m}.$$

Тому що напруги на конденсаторах зрушені по фазі на половину періоду, то сумарна напруга змінюється з подвоєною частотою, тобто частота основної гармоніки випрямленої напруги дорівнює подвоєній частоті мережі. Конденсатори C1 і C2 - елементи схеми випрямлення, тому випрямляч завжди працює на ємнісне навантаження. Часові діаграми струмів i_a , i_2 , напруг u_0 і u_a такі ж, як у мостовій схемі з RC навантаженням.

Основною перевагою схеми подвоєння перед іншими схемами однополуперіодного випрямлення є можливість одержання більшого випрямлення напруги, ніж у схемі з нульовим виводом при тому самому значенні напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора.

До недоліків схеми подвоєння слід віднести великий внутрішній опір, обумовлений тим, що два вхідні в схему випрямлячі з'єднані послідовно.

4.2 Порядок виконання роботи

1. Накресліть схеми випрямлячів, згідно завдання в таблиці 4.1. Покажіть включення приладів для виміру напруги на вторинній обмотці трансформатора U_2 , випрямлених напруги U_0 і струму I_0 .

2. Накресліть часові діаграми роботи цих схем. Характер навантаження й види часових діаграм, зазначені в таблиці 4.1. Індекси означають:

2 - вторинна обмотка трансформатора;

0 - навантаження;

a - вентиль.

Номер варіанта виберіть за вказівкою викладача.

Таблиця 4.1 - Завдання для виконання роботи

Номер варіанта	Схема випрямлення			
	однополуперіодна	двухполуперіодна с нульовим виводом	мостова	подвоєна
1	RC(i_a, u_0)	RL(i_2, u_a)		
2	RL(i_a, u_0)	RC(i_a, u_a)		
3		RL(i_a, u_0)		RC(i_2, u_a)
4		RC(i_a, u_a)		RL(i_2, u_0)
5	RC(i_a, u_0)		RL(i_2, u_a)	
6	RL(i_a, u_a)		RC(i_2, u_a)	
7			RL(i_a, u_a)	RC(i_2, u_a)
8			RC(i_a, u_0)	RL(i_2, u_a)
9		RL(i_a, u_a)	RC(i_2, u_0)	
10		RC(i_2, u_a)	RL(i_a, u_0)	

3. Заповніть таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати проведених розрахунків

Схема (навантаження активне)	U_0/U_2	I_0/I_2	$I_{a_{max}}/I_0$	$U_{обрmax}/U_0$	P_T/P_0	K_n
однополуперіодна						
двухполуперіодна						
мостова						

Розрахуйте випрямляч, що створює на навантаженні постійну напругу 20 В при струмі 0,2 А. Напруга мережі дорівнює 220 В, частота 50 Гц. Конденсатори, що входять у схему випрямляча й фільтра, мають загальну ємність 200 мкФ. Виберіть ту схему випрямлення характер навантаження якої активно-ємнісної. Необхідно вибрати діоди, а також визначити типову потужність і коефіцієнт трансформації трансформатора.

Приведіть рівняння зовнішньої характеристики випрямляча.

4.3 Контрольні запитання

1. Які відмінності між вхідним і вихідним сигналами однополуперіодного випрямляча?
2. Чи однакові частоти вхідного й вихідного сигналів у схемах однополуперіодного й двухполуперіодного випрямлячів?
3. Навіщо необхідні трансформатори в схемах випрямлячів?
4. Які відмінності між сигналом на вході й на виході при двухполуперіодному випрямленні?
5. По осцилограмам вихідної напруги, визначте, чи здійснює випрямний міст однополуперіодне або двухполуперіодне випрямлення?
6. Чому відрізняються вихідні напруги в схемах з випрямним мостом і двухполуперіодним випрямлячем з відводом від середньої точки трансформатора?
7. У якому діапазоні напруг може змінюватися середнє значення вихідної напруги випрямляча з ємнісним фільтром на виході?
8. Які фактори впливають на величину коефіцієнта пульсації випрямляча з ємнісним фільтром на виході?
9. Чи буде відрізнятися середнє значення вихідної напруги однополуперіодної і двухполуперіодної схем випрямлення з ємнісним фільтром, якщо опір навантаження буде дорівнює нескінченності?
10. Чи буде впливати частота вхідної напруги випрямляча на середнє значення вихідної напруги й на коефіцієнт пульсації при фіксованих значеннях ємності фільтра й опору навантаження?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

ЗГЛАДЖУВАЛЬНІ ФІЛЬТРИ

Мета роботи – Вивчити принцип дії і призначення пасивних фільтрів. Засвоїти вимоги, пропоновані до схем фільтрів змінного струму. Ознайомитися з методикою розрахунку і характеристиками схем фільтрів.

5.1 Загальні відомості

5.1.1 Різновиди фільтрів, застосовуваних для згладжування пульсацій змінної складової напруги

Для забезпечення нормальних режимів роботи пристроїв, що одержують живлення від мережі змінного струму, використовуються різноманітні пристрої фільтрації змінної складової випрямленої напруги. До них можна віднести схеми, представлені на рисунку 5.1:

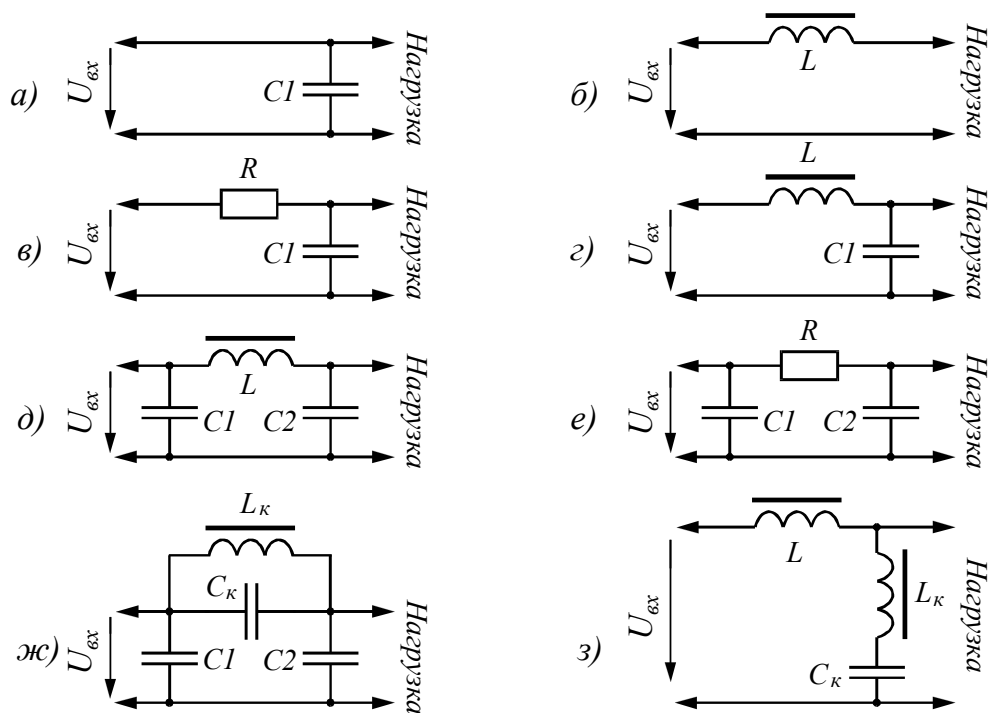


Рис. 5.1 - Схеми пасивних фільтрів:
а) ємнісного; б) індуктивного; в) RC – фільтра; г) LC – фільтра; д) П – образного LC – фільтра; е) П – образного RC – фільтра; ж) з паралельним резонансним контуром; з) з послідовним резонансним контуром

Схеми на рисунку 5.1,в та 5.1,е містять у своєму составі активні опори, що мають теплові втрати й, як наслідок, більш низький коефіцієнт корисної дії.

Напруга на активному навантаженні при багатозафазному випрямленні має вигляд (при $k \rightarrow \infty$):

$$u = U_{cp} + \sum_{i=1}^k U_{mk} \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (5.1)$$

у якому крім постійної складової U_{cp} є ряд змінних складових, основна з яких із частотою $f_{n1} = mf_c$ має найбільшу амплітуду. Змінна складова характеризується коефіцієнтом пульсацій k -ої гармоніки

$$K_{nk} = \frac{U_{nk}}{U_{cp}}. \quad (5.2)$$

У більшості застосовуваних фільтрів основна гармонійна складова випрямленої напруги послабляється гірше вищих гармонійних складових. Тому при аналізі й розрахунках фільтрів використовують коефіцієнт пульсації по першій гармоніці $K_{n1} = \frac{U_{n1}}{U_{cp}}$ або у відсотках $K_{n1} = \frac{U_{n1}}{U_{cp}} \cdot 100$.

З урахуванням того, що $\sin(\omega t + \varphi) = \cos\omega t \cdot \sin\varphi + \sin\omega t \cdot \cos\varphi$, формула (5.1) здобуває вид

$$u(t) = U_{cp} + \sum_{k=1}^k U_{mk \sin} \cdot \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^k U_{mk \cos} \cdot \cos(k\omega t),$$

де $U_{mk \sin} = U_{mk} \cdot \cos\varphi$ й $U_{mk \cos} = U_{mk} \cdot \sin\varphi$.

Величини U_{cp} , $U_{mk \sin}$ і $U_{mk \cos}$ визначають по формулах

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt; \quad (5.3)$$

$$U_{mk \sin} = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(k\omega t) dt; \quad (5.4)$$

$$U_{mk \cos} = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(k\omega t) dt. \quad (5.5)$$

При відомих ортогональних складових модуль змінної складової напруги на виході фільтра дорівнює

$$U_{mk} = \sqrt{U_{mk \sin}^2 + U_{mk \cos}^2}. \quad (5.6)$$

Змінна складова випрямленої напруги погіршує якісні технічні показники, а в системах автоматичного регулювання приводить до помилок.

Фільтри поряд з ослабленням змінної складової трохи знижують постійну напругу на навантаженні. Це ослаблення характеризують коефіцієнтом передачі $\lambda = \frac{U_{вых\,cp}}{U_{вх\,cp}}$, де $U_{вх\,cp}$ й $U_{вых\,cp}$ — постійні складові напруги на вході й виході фільтра, відповідно.

За показник якості фільтра обирають коефіцієнт загасання

$$K_3 = 1/\lambda.$$

Чим менше K_3 , або більше λ , тим якісніше фільтр. Для реальних малопотужних фільтрів

$$K_3 = 1 + \frac{R_\phi \cdot I_{cp}}{U_{cp}}, \quad (5.7)$$

де R_ϕ — активний опір фільтра.

Для фільтрів потужних випрямлячів $K_3 \leq 1,005 \div 1,01$. Згладжуючі якості фільтра оцінюються значенням коефіцієнта згладжування

$$K_\phi = \frac{K_n}{K'_n}, \quad (5.8)$$

де K_n , K'_n — коефіцієнти пульсації на вході й виході фільтра, відповідно.

Фільтри, що згладжують, повинні відповідати наступним вимогам:

- а) не порушувати нормальної роботи джерела;
- б) забезпечувати заданий коефіцієнт згладжування;
- в) мати мінімальне падіння постійної складової напруги й втрати потужності;
- г) власна частота фільтра повинна відрізнятися від частот змінних складових напруги, що згладжується, щоб уникнути резонансних явищ;
- д) мати малі габарити, масу й вартість, бути надійним у роботі.

Фільтри, що згладжують, бувають пасивні й активні. Пасивні фільтри підрозділяються на прості (індуктивні L і ємнісні C) і складні (типу LC й RC , у тому числі одноланкові, багатоланкові, резонансні та ін.).

Активні фільтри в цей час виконуються в основному на транзисторах. Схеми пасивних фільтрів, що згладжують, зображено на рис 5.1.

5.1.2 Ємнісний фільтр

Схема фільтра представлена на рисунку 5.1, а. При $\frac{R_n}{x_c} \geq 10$ живлячу напругу (на виході випрямляча) можна представити як суму постійної складової

U_{cp} й змінної ΔU_n . При кінцевому значенні ємності конденсатора C_1 в струмі й напрузі навантаження залишаються змінні складові (пульсація). Для зменшення змінної складової ємність конденсатора C_1 вибирають так, щоб $x_c = \frac{1}{\omega C_1}$ було на порядок менше R_n . Якщо задане значення коефіцієнта пульсацій K'_n , то зміна напруги на конденсаторі дорівнює:

$$\Delta U_c = \frac{1}{C} \int_0^{T/m} i_c dt = \frac{I_{cp}}{mf_c C_1} . \quad (5.9)$$

Зміна напруги на конденсаторі ΔU_c дорівнює подвійній амплітуді змінної складової. Тому коефіцієнт пульсацій при активному навантаженні буде рівний:

$$K'_n = \frac{U_n}{U_{cp}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta U_c}{U_{cp}} = \frac{1}{2mf_c C_1 R_n} . \quad (5.10)$$

Звідси розрахункова формула для C_1 , мкФ:

$$C_1 = \frac{10^6}{2mf_c R_n K'_n} . \quad (5.11)$$

Недоліки ємнісного фільтра полягають у наступному: при заряді конденсатора перевантажується джерело живлення (випрямляч) більшим зарядним струмом і зменшується час протікання струму через вентилі.

5.1.3 Індуктивний фільтр

Являє собою котушку з феромагнітним сердечником (дросель) включену послідовно з навантаженням.

Принципова схема індуктивного фільтра представлено на рисунку 5.1, б. При активному навантаженні коефіцієнт пульсацій на виході випрямляча

$K_n = \frac{U_n}{U_{вх ср}}$ рівний:

$$K'_n = \frac{U'_n}{U_{вых ср}} = \frac{I'_n}{I_{вых ср}} . \quad (5.12)$$

При цьому

$$I_{вых\,cp} = \frac{U_{cp}}{R_n + R_L}; \quad I'_n = \frac{U'_n}{\sqrt{(R_n + R_L)^2 + (m\omega L)^2}}. \quad (5.13)$$

Підставивши (5.12) у (5.13), після перетворень одержимо:

$$K'_n = K_n \cdot \frac{R_n + R_L}{\sqrt{(R_n + R_L)^2 + (m\omega L)^2}} = \frac{K_n}{K_\phi}. \quad (5.14)$$

При заданому K_ϕ і враховуюючи $R_L \ll R_n$, з (5.14) одержуємо просту формулу для визначення L :

$$L \approx \frac{K_\phi R_n}{m\omega}. \quad (5.15)$$

Індуктивний фільтр доцільно застосовувати в багатофазних схемах випрямлення при невеликому вхідному опорі навантаження.

До недоліків індуктивного фільтра ставляться: залежність коефіцієнта згладжування фільтра від струму (опору) навантаження; виникнення перенапруги на дроселі при різкій зміні струму навантаження (особливо при обриві ланцюга).

5.1.4 Г - образні індуктивно-ємнісні (LC) і активно-ємнісні (RC) фільтри

Схеми RC й LC образних фільтрів представлено на рисунках 5.1, в та 5.1, г. В LC -фільтрі габарити й маса дроселя й конденсатора визначаються величиною енергії, що запасається в них. Енергія магнітного поля в дроселі пропорційна квадрату струму, а енергія електричного поля конденсатора пропорційна квадрату напруги.

Щоб виключити можливість виникнення резонансу на частотах, близьких до f_{nl} , необхідне виконання умови $m\omega_c > \frac{1}{\sqrt{LC}}$. У випрямних пристроях малої потужності й малих струмах навантаження вигідніше застосовувати активно-ємнісний фільтр, який у порівнянні з LC -фільтром значно дешевше, має менші масу й габарити.

Одним зі способів зниження габаритів і маси фільтрів є підвищення частоти струму джерела електроенергії й застосування схем з більшим числом фаз випрямлення. При виборі типу фільтра, його елементів і розрахунках їх параметрів керуються насамперед заданим значенням коефіцієнта пульсацій на навантаженні K'_n (частіше по основній гармоніці). Для заданої схеми випрямлення й коефіцієнта пульсації на навантаженні K'_n визначається коефіцієнт згладжування K_ϕ , який повинен забезпечити фільтр.

Розглянемо еквівалентну схему Г-образного фільтра (рисунок 5.1, в, г), де Z_1 – повний опір послідовно включеного елемента фільтра (R або L) і Z_2 – повний опір вихідного елемента фільтра й навантаження. Коефіцієнт згладжування рівний:

$$K_\phi = \frac{\Delta U_n}{\Delta U'_n}. \quad (5.16)$$

Звичайно $\frac{Z_1}{Z_2} \gg 1$, тому можна вважати, що $K_\phi \approx \frac{Z_1}{Z_2}$. Для LC -фільтра (рисунок 5.1, г) маємо:

$$\underline{Z}_1 = R_L + j\omega L; \quad \underline{Z}_2 = \frac{R_n}{1 + j\omega R_n C_1}.$$

Враховуючи, що $R_L \ll \omega L$ й $R_n \gg \frac{1}{\omega C_1}$ одержуємо

$$\underline{Z}_1 = j\omega L \text{ та } \underline{Z}_2 = -j \frac{1}{\omega C_1}.$$

Тоді коефіцієнт згладжування рівний:

$$K_\phi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C_1}}{\frac{1}{\omega C_1}} = m^2 \omega^2 LC_1 - 1 \quad (5.17)$$

або

$$LC_1 = \frac{K_\phi + 1}{m^2 \omega^2} \quad (5.18)$$

Якщо відома схема випрямлення, частота живлячого напруги й задане значення K_ϕ , то з (5.18) можна розрахувати значення L і C . Значення L й C вибирають із урахуванням відзначених вище вимог, виконання яких дозволить виключити резонанс і забезпечити індуктивний характер навантаження. Для цього повинні виконуватися умови

$$m\omega L > \frac{1}{m\omega C_1} \text{ і } m\omega \geq \frac{1}{\sqrt{LC_1}}.$$

Для RC -фільтра (рисунок 5.1, в) коефіцієнт згладжування можна визначити з вираження

$$K_\phi = \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} = \frac{R - j \frac{1}{m\omega C_1}}{-j \frac{1}{m\omega C_1}} = m^2 \omega^2 LC_1 + 1. \quad (5.19)$$

При переході до модулів і врахування R_n одержимо:

$$K_\phi = \sqrt{(m\omega R_1 C_1)^2 + 1} \cdot \frac{R_n}{R_1 + R_n} \approx \frac{m\omega R_1 C_1 R_n}{R_1 + R_n}. \quad (5.20)$$

Із цього вираження при заданому значенні K_ϕ можна визначити добуток $R_1 C_1$:

$$R_1 C_1 = \frac{K_\phi}{m\omega} \cdot \frac{R_1 + R_n}{R_n}. \quad (5.21)$$

При визначенні параметрів RC -фільтра важливо враховувати втрати у фільтрі, тобто його КПД:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_\phi} = \frac{R_n}{R_n + R_\phi} \quad (5.22)$$

де P_ϕ — втрати потужності у фільтрі.

Наприклад, обираючи $\eta=0,6$, з вираження (5.21) з урахуванням (5.22) одержуємо:

$$C_1 = \frac{K_\phi}{m\omega R_1} \cdot \frac{1}{\eta} = \frac{2,5 \cdot K_\phi}{m\omega R_n}, \quad (5.23)$$

$$\text{де } R_1 = \frac{1-\eta}{\eta} \cdot R_n.$$

5.1.5 П – образний фільтр

Фільтри на рисунках 5.1, д і 5.1, е можна представити як двухланкові, що полягають із ємнісного фільтра й Г-образного RC - або LC -фільтра, відповідно. Коефіцієнт згладжування такого фільтра дорівнює добутку коефіцієнтів згладжування складових ланок і в загальному випадку дорівнює:

$$K_{\Pi} = K_C \cdot K_{\Gamma}. \quad (5.24)$$

Похибка визначення K_{Π} по (5.24) невелика й залежить від активного опору дроселя, а також від виконання умови.

При розрахунках параметрів і виборі елементів П-образного фільтра слід виходити з необхідності одержання найменших габаритів, маси й вартості. Звичайно вибирають $C_1 = C_2$. Разом із цим необхідно обґрунтувати доцільність використання П-образного фільтра замість Г-образного, у якого $C = C_1 + C_2$. Для оцінки розглянемо відношення K_{Π}/K_{Γ} обираючи $C_1 = C_2$. У цьому випадку можна записати

$$\frac{K_{\Pi}}{K_{\Gamma}} = \frac{m^2 \omega^2 L C_1 \cdot \frac{1}{m \omega C R_n}}{m \omega L \cdot 2 C_1} = \frac{1}{2 m \omega R_n C} \quad (5.25)$$

З вираження (5.25) видно, що при більших опорах навантаження вигідніше використовувати П-образні фільтри, при малих навантаженнях (декілька Ом) краще Г-образні, тому що K_{Π} мало відрізняється від K_{Γ} .

5.1.6 Багатоланкові фільтри

Такі фільтри використовуються в тих випадках, коли необхідно одержати більші значення коефіцієнтів згладжування. Схема при цьому представляє послідовне з'єднання П – або Г – образних фільтрів $K_{\phi\Sigma} = K_{\phi 1} \cdot K_{\phi 2} \cdot \dots \cdot K_{\phi N}$.

5.1.7 Резонансні фільтри

Для визначення параметрів елементів, що входять у паралельний або послідовний резонансний контур (рисунки 5.1, ж і 5.1, з), потрібно виразити їхні комплексні вхідні опори.

Для паралельного резонансного контуру (рисунок 5.1, ж) можна записати

$$\underline{Y} = \frac{1}{R_L + j\omega L} + \frac{1}{R_C - j/\omega C} = \frac{R_L - j\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2} + \frac{\omega C \cdot (R_C \omega C + j)}{(R_C \omega C)^2 + 1} = G - jB, \quad (5.26)$$

де R_L й R_C – активні опори дроселя й конденсатора.

Після перетворень реактивна складова провідності має вигляд

$$B = \frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2} - \frac{\omega C}{(R_C \omega C)^2 + 1}. \quad (5.27)$$

Для визначення резонансної частоти ω_0 повинна виконуватися умова $B = 0$. Тоді, вирішуючи останнє рівняння знаходимо

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \sqrt{\frac{L - R_L^2 C}{L - R_C^2 C}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \times \sqrt{1 - R_L^2 C / L}, \quad (5.28)$$

де ухвалюємо $R_C = 0$.

Добротність паралельного резонансного контуру визначається при ω_0 як

$$Q = \frac{\sqrt{C/L}}{G}. \quad (5.29)$$

Комплексний вхідний опір послідовного коливального контуру (рисунк 5.1, 3) має вигляд

$$\underline{Z} = R_L + R_C + j\left(\omega L - 1/\omega C\right) = R + jX. \quad (5.30)$$

Повний опір контуру

$$z = \sqrt{(R_L + R_C)^2 + \left(\omega L - 1/\omega C\right)^2}$$

на частоті ω_0 дорівнює активній складовій всього ланцюга, при цьому $z = R_L + R_C$. Частота резонансу ω_0 знаходиться за вираженням $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, а

добротність контуру $Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$. Величина Q показує, у скільки раз напруга на реактивних елементах перевершує напругу джерела живлення цього контуру при резонансі.

5.1.8 Активні фільтри

У пасивних фільтрах маса й габарити дроселів порівнянні з розмірами перетворювального трансформатора. Наявність немагнітного зазору в дроселі збільшує магнітне розсіювання і є джерелом електромагнітних перешкод. Транзисторні фільтри (рисунк 5.2) не мають дроселя, мають меншу масу й габарити й можуть мати малий вихідний опір.

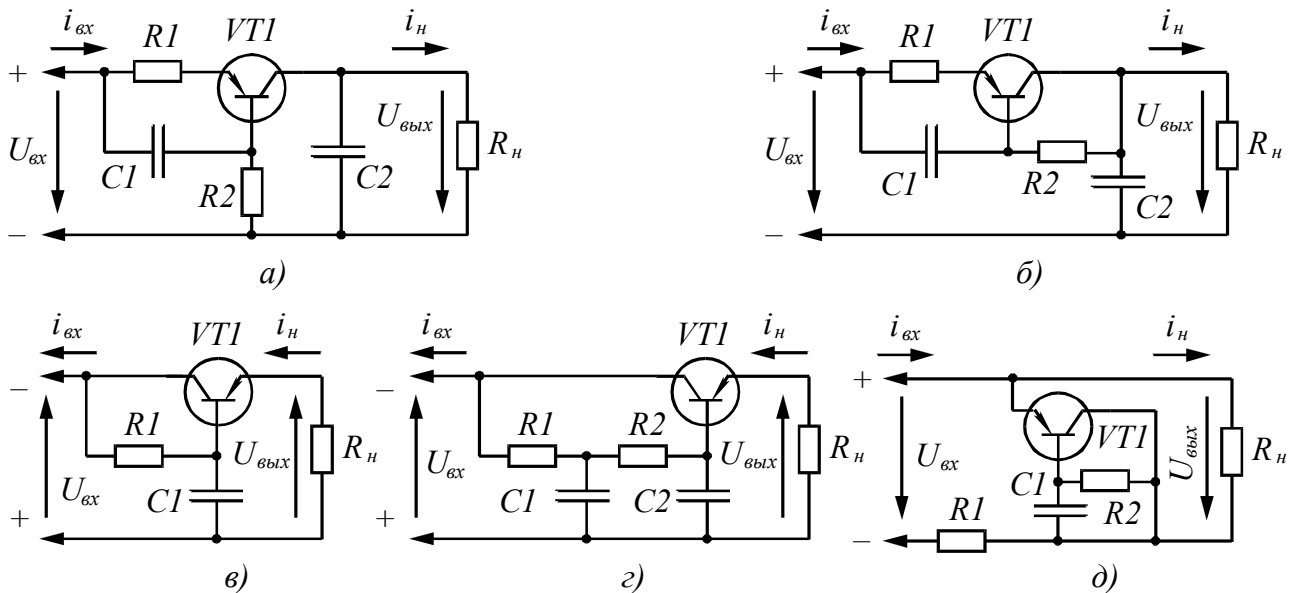


Рис. 5.2 – Схеми транзисторних фільтрів з послідовним (а-г) і паралельним (д) включенням регулюючого транзистора й навантаження

Принцип дії транзисторних фільтрів ґрунтується на особливостях вихідних характеристик транзисторів (рисунк 5.3).

По своїй дії вони подібні LC – і RC – фільтрам. Активні фільтри забезпечують незалежність коефіцієнта згладжування від струму навантаження.

Недоліком активних фільтрів є значний вплив зміни температури на режим роботи транзистора. Принцип дії транзисторного фільтра заснований на тому, що опір транзистора по змінному струму може бути в багато разів більше, ніж по постійному. На робочій ділянці характеристики a – b струм емітера практично постійний ($I_e \approx const$) і опір транзистора змінний складовий струму навантаження ($r_d \approx tg\alpha_1$) великий, а для постійної складової $r_{cm} \approx tg\alpha_2$ – малий. Транзисторні фільтри залежно від способу включення навантаження підрозділяються на фільтри з послідовно включеним навантаженням в ланцюг колектора (рисунк 5.2, а та б) або в ланцюг емітера (рисунк 5.2, в та г) транзистора й з навантаженням, включеним паралельно транзистору (рисунк 5.2, д). При послідовному включенні навантаження й транзистора з метою зменшення пульсацій випрямленої напруги (особливо при використанні однофазних випрямлячів) включається попередній пасивний ємнісний фільтр для того, щоб миттєві значення напруги не досягали $U_{кmin\delta on}$. Залежно від

способу зсуву потенціалу бази транзистора фільтри бувають із фіксованим (рисунок 5.2, а) і автоматичним (рисунок 5.2, б) зсувом.

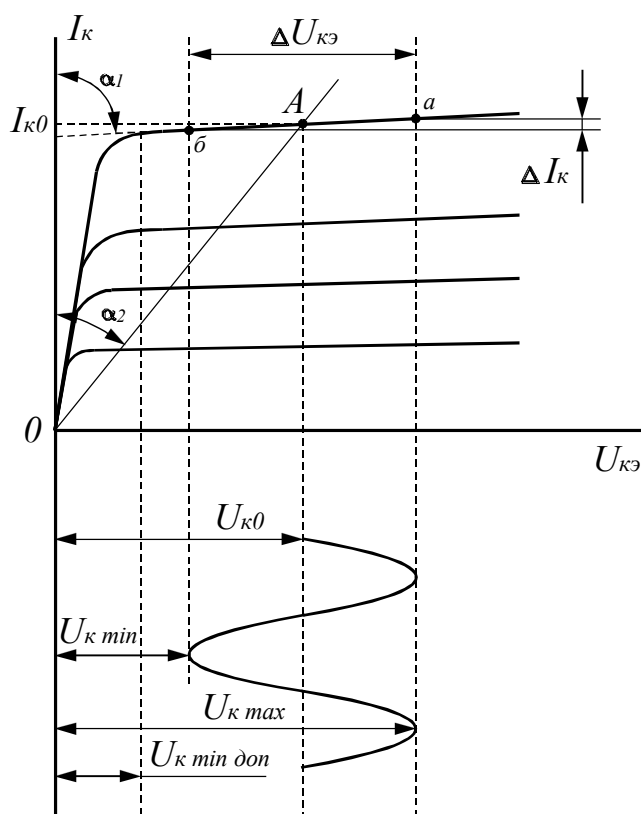


Рис. 5.3 – Колекторна характеристика транзистора

Струм колектора $I_K = I_H$ транзистора (рисунок 5.2, а) майже не залежить від напруги $U_{ке}$ й в основному визначається струмом емітера I_e . Для робочої точки опір транзистора по постійному струму дорівнює $r_{cm} \approx U_{ке} / I_K$ й становить кілька десятків Ом. Якщо $I_e = const$, то будь-яка зміна напруги на колекторі веде до переміщення точки А по характеристиці. При цьому опір колекторного переходу змінний складовий струму дорівнює $R_K = \Delta U_{ке} / \Delta I_K$, що становить кілька тисяч Ом. Для підтримки е в схемі передбачений ланцюг $R_I C_I$, що має більшу постійну часу. У цьому випадку струм $I_e = U_{C_I} / R_I$ за час одного періоду майже не змінюється. Однак наявність R_I у схемі зменшує її КПД приблизно на 20%. У схемі фільтра з фіксованим зсувом (рисунок 5.2, а) вихідна напруга залежить від температури й струму навантаження. Фільтр із автоматичним зсувом на рисунку 5.2, б забезпечує компенсацію цих факторів, але має значно менший коефіцієнт згладжування. Конденсатор C_2 у фільтрах на рисунку 5.2, а та б служить додатковим фільтром пульсацій напруги на виході.

Схеми на рисунках 5.2, в та г мають ряд переваг у порівнянні з фільтрами на рисунках 5.2, а та б:

- 1) малий вхідний опір (менш 1 Ом);

2) при введенні автоматичного зсуву бази транзистора зменшується вплив зміни температури.

У цих фільтрах конденсатор C_2 можна не встановлювати, тому що він не дає значного збільшення коефіцієнта згладжування. Відсутність резистора, включеного послідовно із транзистором, значно підвищує КПД.

При малих величинах вихідної напруги й значних струмах навантаження застосовують фільтри з паралельним включенням транзистора й навантаження (рисунок 5.2, д). При цьому транзистор, по своїй дії аналогічний конденсатору в активно-ємнісному фільтрі. Схема паралельного фільтра, керована з виходу, зображена на рисунку 5.2, д, і є найпоширенішою, тому що вона не вимагає підстроювання – її характеристики менш чутливі до коливань температури.

5.2 Порядок виконання роботи

5.2.1 Завдання для виконання роботи

Відповідно до варіанта завдання (таблиця 5.1), зазначеного викладачем, здійснити розрахунок фільтра і його параметрів відповідно до наведених у методичних вказівках розрахункових формул. Для індуктивності, що не входить у резонансний контур, прийняти $R_L = m\omega L / 20$.

Таблиця 5.1 — Исходные данные для расчетных вариантов

№ з/п	Напруга на вході фільтру $U_{ср\ вх}/U_n$, В	Опір навантаження R_n , Ом	m	Активний опір R_L , Ом	η	K_ϕ	Рисунок 5.1, схема
1	100/20	35	1	—	85	4	5.1,в
2	70/10	50	2	0,25	—	10	5.1,г
3	120/25	40	1	0,1	—	7	5.1,д
4	80/12	30	2	—	70	5	5.1,е
5	40/15	25	1	0,1	—	25	5.1,ж
6	50/10	22	2	0,15	—	40	5.1,з
7	80/8	35	1	—	75	7	5.1,в
8	60/10	40	2	0,15	—	8	5.1,г
9	50/14	40	1	0,2	—	11	5.1,д
10	60/15	30	2	—	80	9	5.1,е
11	70/20	25	1	0,2	—	20	5.1,ж
12	150/35	55	2	0,25	—	30	5.1,з

5.3.2 Порядок дій

Розрахувати наступні параметри згладжувального фільтру:

1. Активні, індуктивні і ємнісні опори елементів, що входять у фільтр;

2. Коефіцієнти пульсації й загасання на вході й виході фільтра;
3. Середні значення струмів і напруг на вході й виході фільтра;
4. Для всіх варіантів схем фільтрів розрахувати втрати активної енергії;
5. Для схем фільтрів, що мають резонансні контури, розрахувати величини індуктивності L_k , ємності C_k й добротність контуру Q ;
6. Для схем активних фільтрів розрахувати параметри ланцюжка $R_l C_l$, з обліком заданого в розрахунковому варіанті коефіцієнта згладжування.

5.3.3 Віртуальне середовище Electronic Workbench

Вивчення роботи пасивних і активних фільтрів здійснюється за допомогою програми «Electronic Workbench», що працює в середовищі Windows. Після запуску програми необхідно розробити схему фільтру. Наводячи курсор на потрібні елементи схеми фільтрів і здійснюючи швидке подвійне натискання можна відкривати вікна «властивості» і змінювати параметри елементів. Зміну параметрів елементів необхідно підтверджувати натисканням кнопки «Enter» або кнопки «Ok» у вікні «властивості» даного елемента. Для зняття амплітудно-частотної характеристики фільтра потрібно в наборі елементів «Instruments» вибрати «Multimeter» (мультиметр) і перенести його у вікно відкритого додатка. Послідовно наводячи курсор «миші» на одну із клем вимірювального приладу й утримуючи натиснутої її ліву кнопку здійснити підключення до вхідного або вихідного ланцюга досліджуваної схеми фільтра. Вибравши в наборі елементів «Instruments» вимірювальний прилад «Oscilloscope» (осцилограф) і виконуючи дії, подібні до дій з «Multimeter», перенести його у вікно відкритого додатка. Двічі швидко натиснути на значок «Oscilloscope» установити масштабний коефіцієнт розгорнення по горизонталі в осцилографі $0,01\text{ s/div}$ ($0,01\text{ c/поділку}$). Масштабний коефіцієнт розгорнення по вертикалі потрібно вибрати відповідно до вихідних даних розрахункового варіанта, зазначеного викладачем. При роботі з осцилографом можна використовувати обидва входи осцилографу й задавати для них різні масштабні коефіцієнти розгорнення по вертикалі (mv/div або V/div). У цьому випадку, для перегляду результатів виміру, зручно призначити різні кольори для спостережуваних вхідних величин. Для цього необхідно навести курсор на одну з підходящих до осцилографу ланцюгів двічі швидко двічі натиснути ліву кнопку «миші» і, у вікні властивостей, нажавши кнопку «Set Wire Color» вибрати колір. Вибір кольору підтвердити натисканням кнопки «Ok». Після підключення вимірювальних приладів натиснути на клавішний перемикач «Activate simulation», що перебуває у верхньому правому куті відкритого додатка, і записати величини змінної й постійної складових вхідних і вихідних напруг схеми досліджуваного фільтра. Для цього, двічі швидко нажавши ліву кнопку «миші» на значку «Multimeter», на панелі, що відкрився, властивостей здійснити перемикання між кнопками « \approx » і « $=$ ». Для перегляду тимчасових діаграм напруг за допомогою осцилографу необхідно в такий же спосіб відкрити його вікно властивостей. Використовуючи кнопки «AC» (вимір тільки змінної складової напруги) і «DC» (вимір змінної й

постійної складових напруги), проаналізувати роботу фільтра. Для зупинки процесу виміру необхідно натиснути клавішний перемикач «Activate simulation» ще один раз. У звіті по лабораторній роботі необхідно привести вихідні дані по варіанту завдання, схему досліджуваного фільтра, результати вимірів і висновки.

5.3 Контрольні запитання

1. Вимоги, пропоновані до схем фільтрів.
2. Основні показники схем фільтрації.
3. Способи включення індуктивності і ємності в схемах фільтрів.
4. Способи зниження пульсацій вихідної напруги.
5. Вибір параметрів елементів схем в) і г) на рисунку 5.1.
6. Вибір параметрів елементів схем д) і е) на рисунку 5.1.
7. Вибір параметрів елементів схем ж) і з) на рисунку 5.1.
8. Пояснити вплив магнітопроводу дроселя на характеристики фільтрів.
9. Як вибрати параметри паралельного й послідовного LC – контуру.
10. Як впливає добротність резонансного контуру на роботу фільтра.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

ВИМІР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕСЛАМЕТРА

Мета роботи – визначення індукції магнітного поля постійного магніту, побудова графіка залежності магнітної індукції від відстані до магніту.

6.1 Загальні відомості

6.1.1 Теорія магнітного поля

Електричний заряд, що рухається, створює навколо себе магнітне поле. Цей факт уперше встановив в 1820 р. Г. Ерстед. Основною силовою характеристикою магнітного поля є магнітна індукція \vec{B} .

Зворотне явище - виникнення струму в контурі під впливом магнітного поля (електромагнітна індукція) було відкрито в 1831 р. Майклом Фарадеєм. Явище електромагнітної індукції полягає у виникненні ЕРС індукції в контурі, потік вектора магнітної індукції через який міняється. Якщо контур є замкненим і провідним, то в ньому виникає індукційний струм. Досліджуючи явище електромагнітної індукції, Фарадей встановив, що величина ЕРС індукції ε_i , що виникає в замкненому контурі, пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Φ , зчепленому із цим контуром

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6.1)$$

де $\Phi = \int_s B_n dS$ - магнітний потік крізь поверхню, обмежену контуром.

Загальне правило для знаходження напрямку індукційного струму в 1833 г. навів росіянин-учений Є.Х. Ленц. Згідно із цим правилом індукційний струм має такий напрямок, що створюване ним магнітне поле прагне компенсувати зміну магнітного потоку, що викликало цей індукційний струм.

Знайдемо заряд q , який протікає через поперечний переріз провідника внаслідок електромагнітної індукції. За законом Ома

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (6.2)$$

Звідки

$$dq = Idt = -\frac{1}{R} d\Phi. \quad (6.3)$$

Проінтегрувавши це вираження, знайдемо заряд

$$q = \int dq = -\frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = \frac{1}{R} (\Phi_1 - \Phi_2). \quad (6.4)$$

Співвідношення (6.4) лежить в основі способу виміру індукції в даній лабораторній роботі.

6.1.2 Вимірювання магнітного поля

Тесламетр ЕМ4305 призначений для виміру:

- радіальної складової індукції постійного магнітного поля (0-1500 мТл, $\pm 0,5\%$);
- радіальної складової середньоквадратичного значення синусоїдальної форми змінного магнітного поля (0-100 мТл, $\pm 4\%$);
- осьової складової індукції постійного поля (0-19,99 мТл, $\pm 2,5\%$).

Тесламетр призначений для вимірів: радіальної складової індукції постійного магнітного поля й середньоквадратичного значення синусоїдальної форми змінного магнітного поля за допомогою первинного перетворювача товщиною не більш 0,95 мм; осьової складової індукції постійного магнітного поля за допомогою первинного перетворювача діаметром 6 мм.

З'єднання первинних перетворювачів із входним роз'ємом приладу здійснюється гнучкими кабелями довжиною 1,5 м.

Вибір діапазону вимірів і виду вимірюваної індукції - ручний.

Значення кліматичних факторів за ГОСТ 22261-82, група 2 і ГОСТ 15150-69, умови УХЛ 4.2. Індукція радіальної складової постійного й змінного

магнітних полів вимірюється за допомогою первинного вимірювального перетворювача ПІП-РАД, виконаного у вигляді зонда. Індукція осьовий складової постійного магнітного поля вимірюється за допомогою первинного вимірювального перетворювача ПІП-АКС, виконаного у вигляді зонда.

Увага! Додання механічних зусиль до вимірювальних частин первинних вимірювальних перетворювачів неприпустимо!

Таблиця 6.1 - Робочі умови застосування приладу ЕМ4305

Величина, що впливає	Значення величини, що впливає
Температура навколишнього повітря, °С	10-35
Відносна вологість повітря при 25 °С, %	80
Атмосферний тиск, кПа (мм рт.ст.)	84 - 106,7 (630-800)
Напруга живильної мережі, В	198 - 242
Частота живильної мережі, Гц	49,5 - 50,5
Форма кривої вимірюваної індукції змінного магнітного поля	Синусоїдальна з коефіцієнтом гармонік не більш 5 %

6.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою й правилами користування тесламетром ЕМ4305.

2. Приєднати вимірювальний перетворювач ПІП-РАД тесламетра до відповідного роз'єму.

3. Поворотом ручки перевести перемикач у позицію "вимір". Розташовуючи перетворювач по черзі у всіх фіксованих положеннях щодо полюса магніту, при цьому зняти показання тесламетра.

ПРИМІТКА. Виміри починати від положення щупа, яке ближче всього до нейтральної лінії магніту. Для зручності користування тесламетром бажано щораз після установки щупа на певній відстані від постійного магніту встановлювати коректором стрілку приладу на нуль шкали.

4. Накреслити криву зміни магнітної індукції по довжині середньої магнітної лінії, тобто $B=f(l)$.

Таблиця 6.2 – Результати експерименту

№	l , см	B , мТл
1	0,0	
2	0,5	
3	1,0	
4	1,5	
5	2,0	
6	2,5	
7	3,0	
8	3,5	
9	4,0	
10	4,5	

6.3 Контрольні питання

1. Який закон є вираженням вихрового характеру магнітного поля?
2. Що називається магнітним потоком? У чому полягає теорема Остроградського-Гаусса для магнітного поля і який її фізичний зміст?
3. Яким образом можна здійснити екранування магнітного поля?
4. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
5. Сформулюйте закони Шараді й Ленца для електромагнітної індукції. Проілюструйте їхніми прикладами.
6. Дайте опис тесламетра й принципу його роботи.
7. Одиниця виміру магнітного потоку.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

ВИПРОБУВАННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи – Придбати практичні навички по використанню й випробуванню трансформаторів. Навчитися дослідним шляхом визначати основні параметри й характеристики трансформаторів.

7.1 Загальні відомості

7.1.1 Основні параметри однофазних трансформаторів

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення за допомогою магнітного поля електричної енергії змінного струму однієї напруги в електричну енергію змінного струму іншої напруги тієї ж частоти.

Трансформатори застосовують у лініях електропередачі, у техніці зв'язку, автоматичній, вимірювальній техніці й інших областях. Відповідно до призначення розрізняють: силові трансформатори для живлення електричних двигунів і електричних мереж; спеціальні трансформатори для живлення зварювальних апаратів, електропечей і інших споживачів, вимірювальні трансформатори для підключення вимірювальних приладів.

По числу фаз трансформатори ділять на одно- і трифазні. По числу обмоток розрізняють двухобмоточні та багатообмоточні трансформатори.

Трансформатор являє собою замкнений магнітопровід, на якому розташовано дві або кілька обмоток. Для зменшення втрат на гістерезис магнітопровід виготовляють із магнітом'якого матеріалу – трансформаторної сталі, що має вузьку петлю намагнічування. Для зменшення втрат на вихрові струми (струми Фуко) у матеріал магнітопроводу вводиться домішка кремнію, що підвищує його електричний опір, а сам магнітопровід збирають із окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35-0,5 мм, ізольованих друг від друга теплостійким лаком або спеціальним папером.

Обмотки трансформатора виготовляють із мідного провідника й розташовують на тому самому або на різних стрижнях, поруч або одна під іншою. В останньому випадку безпосередньо до стрижня примикає обмотка нижчої напруги, а поверх неї розміщується обмотка вищої напруги.

Обмотку трансформатора, до якої підводиться напруга живильної мережі, називають первинною. Обмотку, до якої приєднується навантаження – вторинної.

Робота трансформатора заснована на явищі взаємної індукції. При підключенні первинної обмотки трансформатора до мережі змінного струму напругою U_1 по обмотці починає проходити струм I_1 , який створює в магнітопроводі змінний магнітний потік. Магнітний потік, пронизуючи витки вторинної обмотки, індуктує у ній ЕРС E_2 , яку можна використовувати для живлення навантаження.

Одним з основних параметрів трансформатора є коефіцієнт трансформації K :

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

де U_1, U_2 – напруги на первинній і вторинній обмотках; w_1, w_2 – число витків обмоток трансформатора (відповідно).

При роботі трансформатора за рахунок струмів в обмотках, а також перемагнічування магнітопроводу й вихрових струмів виділяється теплота, тобто частина електричної потужності, що підводиться до трансформатора, втрачається. Звичайно втрати потужності становлять 1–5 % від номінальної потужності трансформатора. Втрати розділяють на два види:

– втрати в сталі сердечника (складаються із втрат, створюваних перемагнічуванням сердечника й вихровими струмами) – $P_{ст}$;

– втрати в міді обмоток – P_m .

Втрати в міді складаються із втрат у первинній обмотці $I_1^2 R_1$ й втрат у вторинній обмотці $I_2^2 R_2$

$$P_m = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

Втрати в сталі залежать від конструкції сердечника трансформатора й властивостей використаних матеріалів, а також величини магнітного потоку в сердечнику, який у свою чергу визначається напругою на первинній обмотці трансформатора U_1 . Від навантаження трансформатора втрати в сталі не залежать. Втрати в міді, навпаки, залежать від навантаження.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора η визначається як відношення корисної потужності (активної потужності вторинної обмотки – P_2) до витраченої (активної потужності, споживаної первинною обмоткою трансформатора P_1)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_m}.$$

7.1.2 Дослідження холостого ходу трансформатора

Холостим ходом трансформатора називається робота трансформатора без навантаження, тобто при розімкнутій вторинній обмотці. При проведенні дослідження холостого ходу до вторинної обмотки трансформатора підключають вольтметр для виміру напруги U_{10} . Тому що опір вимірювальної обмотки вольтметра великий, його включення імітує розмикання вторинної обмотки.

До первинної обмотки підводиться напруга близька до номінальної. У цьому випадку по первинній обмотці протікає струм холостого ходу I_{10} , струм у вторинній обмотці I_{20} дорівнює нулю. У дослідженні холостого ходу можна визначити коефіцієнт трансформації, потужність втрат у сталі, коефіцієнт потужності, струм холостого ходу трансформатора.

7.1.3 Дослідження струму короткого замикання трансформатора

Режимом короткого замикання називається такий режим, коли виводи вторинної обмотки замикаються провідником з опором рівним нулю. При дослідженні короткого замикання вторинна обмотка трансформатора замикається на амперметр. Опір вимірювальної обмотки амперметра малий, що практично ідентично короткому замиканню.

При короткому замиканні вторинної обмотки трансформатора по ній протікає великий струм, тому що її опір прагне до нуля. Тому дослідження

короткого замикання проводять на зниженій напрузі $U_{1к.з.}$. Напруга на вторинній обмотці $U_{2к.з.}$ дорівнює нулю. Значення струмів у первинній і вторинній обмотках не повинні перевищувати номінальних значень. У дослідженні короткого замикання визначаються наступні параметри: втрати в міді, величини опорів обмоток, процентне значення первинної напруги при короткому замиканні.

7.2 Порядок виконання роботи

7.2.1 Схема лабораторної установки

Лабораторна установка, призначена для випробування однофазного силового трансформатора, складається з однофазного трансформатора з повітряним охолодженням, контрольно-вимірювальних приладів і комутаційно-захисних апаратів.

На рисунку 7.1 наведені електричні схеми лабораторної установки для проведення дослідження холостого ходу (рис. 7.1, а), дослідження короткого замикання (рис. 7.1, б) і дослідження роботи трансформатора при навантаженні (рис. 7.1, в).

7.2.2 Порядок виконання роботи

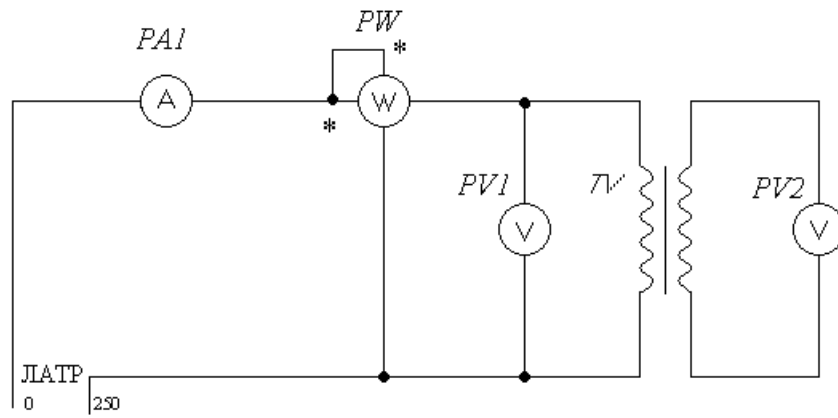
1. Ознайомитися з електричною схемою, приладами, апаратами й іншим устаткуванням експериментальної установки, яке використовується для випробування трансформаторів, і записати їхні технічні характеристики й дані у звіт.

2. Зібрати електричну схему експериментальної установки для проведення дослідження холостого ходу й пред'явити для перевірки викладачеві.

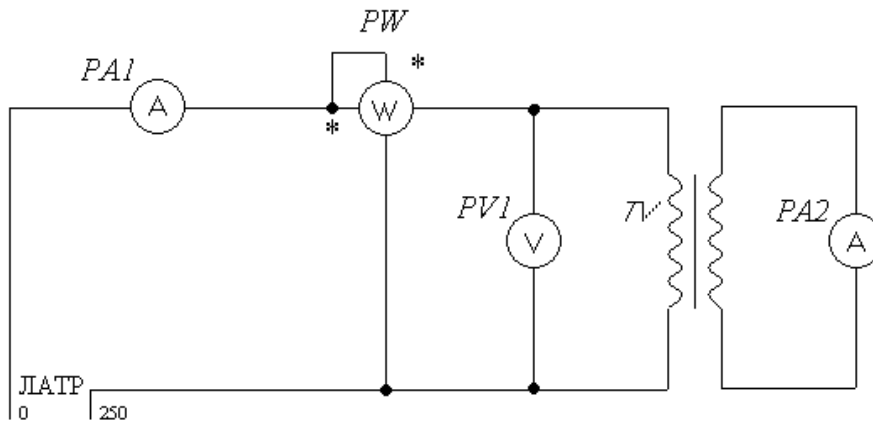
! При виконанні дослідження первинна обмотка трансформатора включається на клема 220 В.

3. Після перевірки правильності з'єднань і одержання дозволу на проведення дослідження включити стенд, установити номінальну напругу на первинній обмотці трансформатора. Вторинна обмотка трансформатора при дослідженні холостого ходу замкнена на вольтметр. Струм у вторинній обмотці трансформатора $I_2 = 0$. Дані спостереження записати в таблицю 7.1.

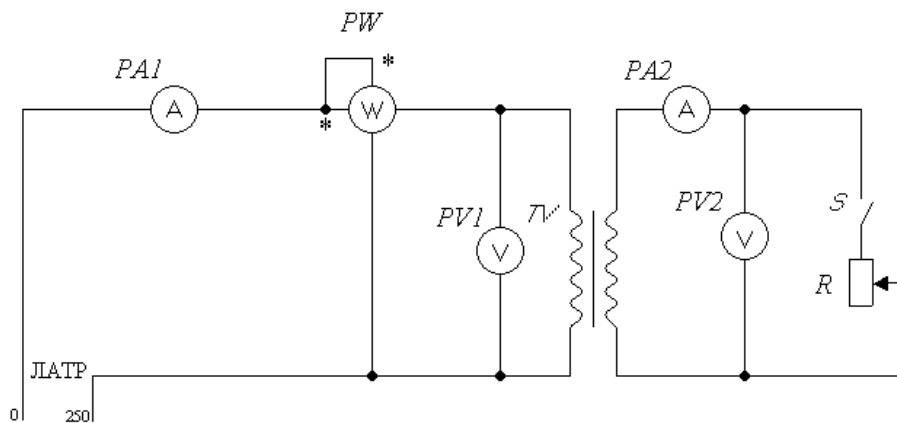
4. На підставі отриманих даних обчислити коефіцієнт трансформації $K_{12} = \frac{U_{10}}{U_{20}}$ і кількість витків у вторинній обмотці трансформатора.



а)



б)



в)

PW – ватметр; $PA1, PA2, PV1, PV2$ – амперметри й вольтметри в первинному і вторинному ланцюгах; S – вимикач навантаження; (0–250 В) – вихід ЛАТРу; R – активне навантаження

Рисунок 7.1 - Електрична схема випробування трансформатора:
а – дослідження холостого ходу; б – дослідження короткого замикання;
в – при навантаженні

Таблиця 7.1 – Результати дослідження

Вимірювані величини		Величини, що обчислюються (при числі витків первинної обмотки $w_1 = 1000$)	
U_{10} , В	U_{20} , В	K_{12}	w_2 , витків
220			
220			
220			

7.3 Контрольні питання

1. Пристрій і принцип дії трансформатора?
2. З якою метою проводиться дослідження холостого ходу? Порядок проведення дослідження холостого ходу.
3. Куди витрачається потужність, споживана трансформатором у режимі холостого ходу?
4. З якою метою проводиться дослідження короткого замикання? Порядок проведення дослідження короткого замикання. Яка напруга підводиться до первинної обмотки при дослідженні короткого замикання?
5. Куди затрачається потужність, споживана трансформатором у режимі короткого замикання?
6. Що називається коефіцієнтом трансформації і як він визначається?
7. Що називається коефіцієнтом корисної дії трансформатора?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8

ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДА Й ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

Мета роботи – ознайомлення з методами експериментального дослідження напівпровідникового діода. Визначення основних параметрів і характеристик.

8.1 Загальні відомості

Дослідним шляхом було встановлено, що в багатьох випадках контакт напівпровідника з металом, а також контакт двох напівпровідників має властивість проводити струм переважно в одному напрямку, що дозволяє використовувати р-п-перехід як випрямляч змінного струму.

Розглянемо роботу напівпровідникового випрямляча, зображеного на рисунку 8.1.

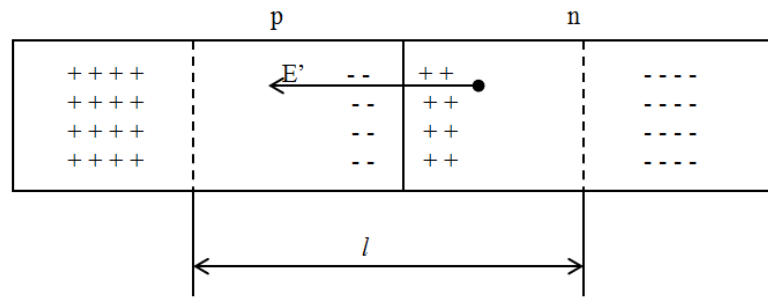


Рисунок 8.1 – Схематичне зображення поперечного перерізу р-п-переходу

На границі контакту р- та n-шару відбувається дифузія електронів, позначених знаком мінус, у бік напівпровідника р-типу, а дірок, позначених знаком плюс, - у бік напівпровідника n-типу. Тоді на границі контакту з боку дірок вийде надлишок електронів, а з боку електронів – надлишок дірок. Нарешті електронів і дірок у приграничному шарі утворюється так багато, що електрони стануть відштовхувати прагнучі перейти приграничний шар нові електрони, а дірки закриють шлях діркам, що рухаються до цього шару. Так створюється подвійний електричний шар товщиною l , що перешкоджає подальшому переходу електронів і дірок через границю контакту двох напівпровідників. Цей подвійний шар являє собою потенційний бар'єр підвищеного опору для носіїв струму.

Такий бар'єр електрони й дірки можуть подолати тільки при високих температурах або ж за допомогою прикладеної до р- та n-областей зовнішнього електричного поля E . Сконцентровані в шарі збіднення електрони й дірки створюють своє електричне поле E' . Опір цього шару можна легко змінювати за допомогою зовнішнього електричного поля.

Нехай провідник n-типу підключений до негативного, а р-типу до позитивного полюсів батареї (рисунок 8.2).

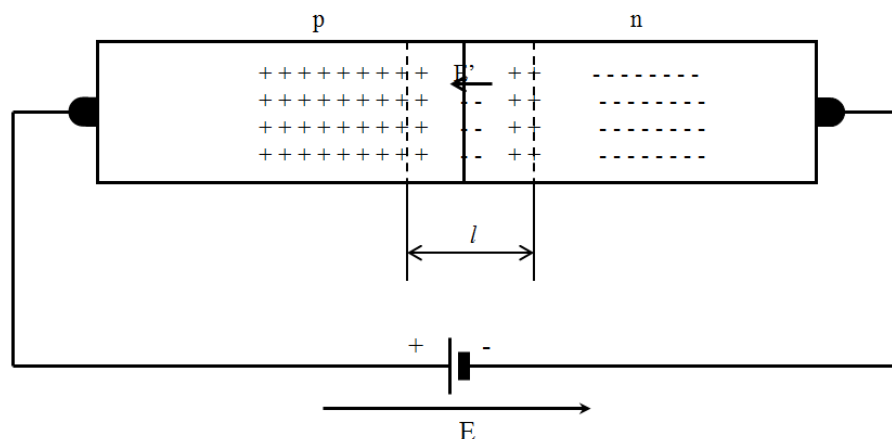


Рисунок 8.2 – Схематичне зображення поперечного перерізу р-п-переходу, підключеного до зовнішнього джерела живлення у прямому напрямку

Під дією зовнішнього поля E , протилежного полю E' шару збіднення, електрони й дірки будуть переміщатися в протилежних напрямках. Опір шару збіднення і його напруженість E' зменшуються і шар збіднення починає зникати. Через напівпровідник в так званому прямому напрямку піде струм.

Якщо до напівпровідника n-типу підключити позитивний, а до р-типу – негативний полюса батареї (рисунок 8.3), то під дією зовнішнього поля E , що збігається по напрямкові з полем E' , електрони й дірки будуть переміщатися від границі контакту в різні сторони.

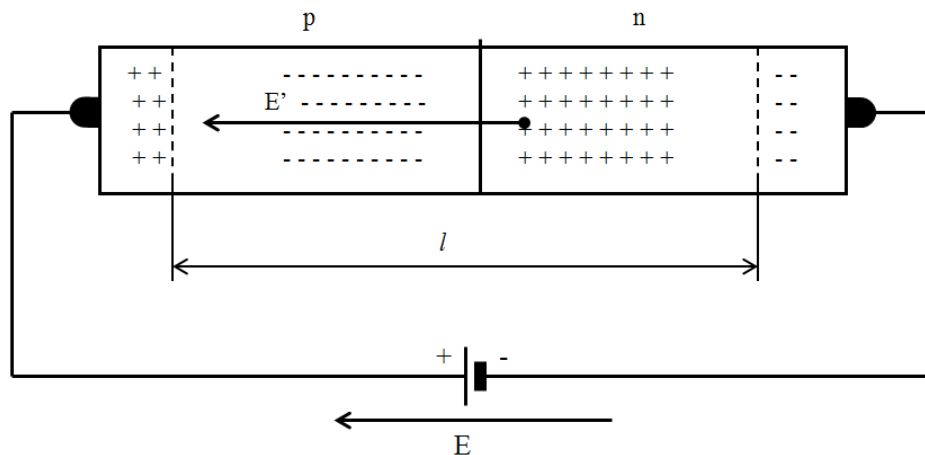


Рисунок 8.3 – Схематичне зображення поперечного перерізу р-n-переходу, підключеного до зовнішнього джерела живлення у зворотному напрямку

Товщина шару збіднення, а отже, і його опір починає рости. Струм через контакт не піде або ж він буде незначним; такий напрямок називається зворотнім.

При підведенні до напівпровідника змінної різниці потенціалів опір шару збіднення буде то зростати, то убувати. У момент зростання опору струм через провідник не піде, а в момент зникнення опору струм стане значним.

Сучасні напівпровідникові випрямлячі (діоди) виготовляють із високоомних кристалів кремнію Si, германія Ge і інших речовин, що мають n-тип провідності. Таку провідність створюють введенням домішки, наприклад індію In, атоми якого мають три валентні електрони. При заміщенні атома Ge атомом In у кристалічній решітці будуть заповнені тільки три зв'язки, один зв'язок залишиться незаповненим, тобто утворюється дірка. Домішку вводять у незначній кількості, наприклад, на поверхню кристала Ge поміщають маленький кристалик In. При температурі 500°C In розплавляється на поверхні Ge, атоми In дифундують в область кристала Ge, змінюючи провідність невеликого шару на р-тип (рисунок 8.4, а). Охолоджена крапля In слугує контактом з дірковим шаром (анодом), до нього приєднують позитивний полюс. Електро, що контактує з Ge (катод), виготовляють зі свинцю або олова. До нього приєднують негативний полюс. На схемах напівпровідникові діоди позначають, як показано на рисунку 8.4, б.

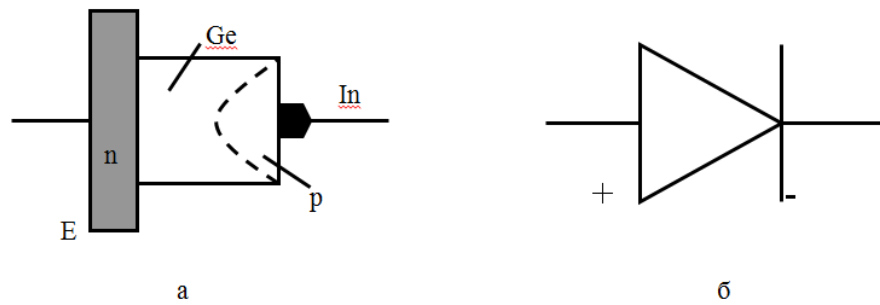


Рисунок 8.4 – Схематичне зображення поперечного перерізу германієвого діода (а) та його позначення (б) на електричних схемах

8.2 Порядок виконання роботи

1. Зняття вольт - амперної характеристики напівпровідникового діода. Підключіть досліджуваний діод до характерографу. Покажіть схему викладачеві. Згідно з наявною на робочому місці інструкцією домогтися зображення на екрані характерографу вольт-амперної характеристики діоду у оптимальному масштабі, як показано на рисунку 8.5. Оцифрувати пряму та зворотну гілки вольт-амперної характеристики та занести дані у таблицю 8.1.

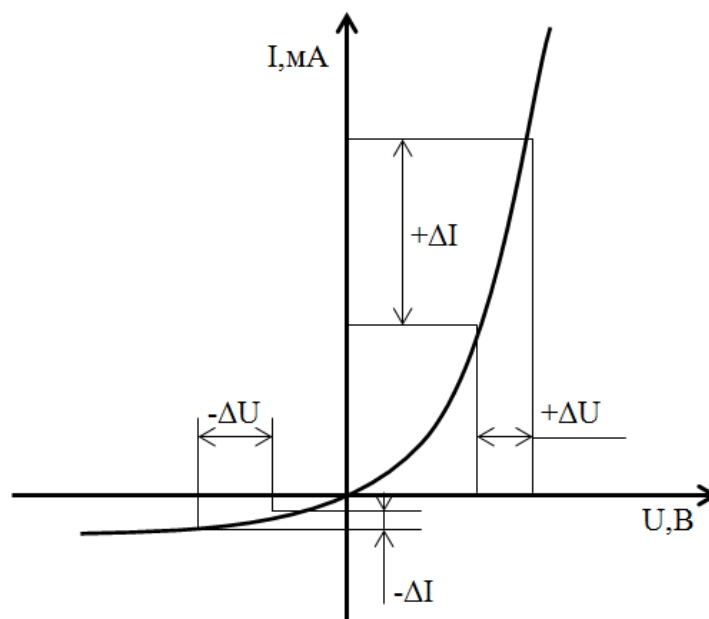


Рисунок 8.5 - Загальний вигляд вольт-амперної характеристики діода

За отриманими значеннями струму побудувати вольт-амперну характеристику напівпровідникового діоду.

2. Визначити параметри напівпровідникового діода:

Таблиця 8.1 – Експериментальні точки вольт-амперної характеристики діода

№ точки	U, В	I, А
1		
2		
3		
4		
...		

За прямолінійною ділянкою вольт-амперної характеристики (рис. 8.5) визначають динамічний прямий і зворотний опори діода як збільшення напруги ΔU до збільшення струму ΔI :

$$R_{\text{пр}} = \Delta U_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{пр}};$$

$$R_{\text{зв}} = \Delta U_{\text{зв}} / \Delta I_{\text{зв}},$$

а також коефіцієнт випрямлення діода

$$K = \Delta I_{\text{пр}} / \Delta I_{\text{зв}},$$

$$\text{при } |\Delta U|_{\text{пр}} = |\Delta U|_{\text{зв}}.$$

8.3 Контрольні питання

1. Основні характеристики діода.
2. Пряма гілка воль-амперної характеристики діода.
3. Зворотна гілка воль-амперної характеристики діода
4. Особливості підключення діода.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ФОТОДІОДА

Мета роботи – Ознайомлення з методами експериментального дослідження напівпровідникового фотодіода. Визначення основних параметрів і характеристик у різних режимах роботи.

9.1 Загальні відомості

Фотодіоди – селективні реєструючі фотоелектричні прилади, засновані на явищі фотовольтаїчного ефекту в напівпровідниковому контактному переході й призначені як для роботи з прикладенням зовнішньої напруги, так і без неї.

Фотовольтаїчним ефектом – (фотогальванічним, вентильним) – називають форму внутрішнього фотоефекта в напівпровідниках із властивостями, неоднорідними для руху фотоносіїв навіть при відсутності зовнішньої напруги, при якій оптично генеровані нерівноважні носії заряду просторово розділяються в об'ємі напівпровідника внаслідок його неоднорідності, утворюючи при цьому просторово розділені об'ємні заряди й, отже, різниця потенціалів між ділянками опроміненого зразка, що називається фото-ЕРС (V_F).

Якщо ці ділянки з'єднати провідником, то при опроміненні напівпровідника в зовнішньому ланцюзі виникає електричний струм, спрямований на зменшення об'ємних зарядів - фотострум (J_F).

До фотовольтаїчних ефектів відносяться, наприклад:

- дифузійний фотоефект,
- фотомагнітоелектричний ефект,
- фотовольтаїчний ефект у напівпровідниковому, контактному переході.

Найбільше застосування в сучасних оптоелектронних приладах знайшов останній вид фотовольтаїчного ефекту, при якому розподіл фотоносіїв відбувається за рахунок дії внутрішнього електростатичного поля. Внутрішнє електростатичне поле утворюється в об'ємі напівпровідника в області контакту напівпровідників з різним типом провідності (p-n переходу) або контакту напівпровідника з металом.

При виготовленні фотодіодів найчастіше застосовуються p-n переходи, тому розглянемо роботу таких фотодіодів.

Фотодіод являє собою пластинку напівпровідникового матеріалу, усередині якого є області домішкової електронної (n – область) і діркової (p – область) провідності. Границю між цими областями називають контактним p-n переходом (рис. 9.1). До електронної та діркової областей формуються омичні контакти, із виводами для вимірювального приладу. З метою запобігання контакту чутливого шару фотодіода із зовнішнім середовищем він покривається лаком або монтується в герметичному корпусі, виготовленому або з металу (зі скляним входним вікном) або із пластмас.

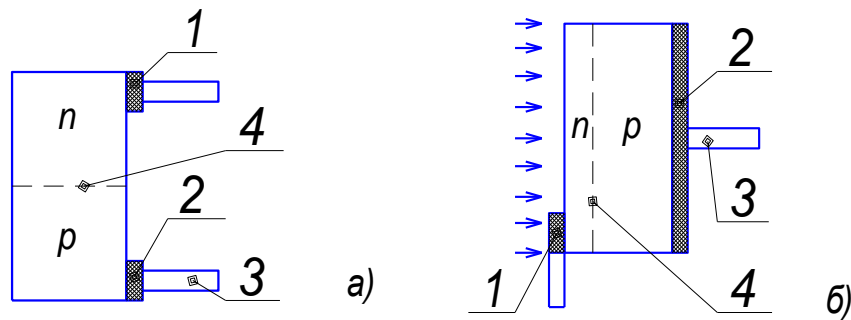


Рисунок 9.1 - Принципова схема фотодіода: а) – напрямок світлового пучка паралельно площині $p - n$ переходу; б) – світловий пучок і площина $p - n$ переходу взаємно перпендикулярні; 1 – контакт до n – області; 2 – контакт до p – області; 3 – виводи; 4 – $p - n$ перехід

При нормальній температурі домішковий напівпровідник містить:

- рухливі заряди – основні носії струму, утворені в переважній більшості термічним збудженням атомів домішки й, у значно меншій кількості – атомами власного напівпровідника;
- рухливі заряди – неосновні носії струму, утворені термічним збудженням власного напівпровідника;
- нерухливі заряди – іони домішок.

Якщо усередині напівпровідника граничать дві області з різним типом провідності, то виникає дифузія основних носіїв струму: дифузійні струми електронів з n – області в p – область (струм I_{nn}) і дірок з p – області в n – область (струм I_{pp}) (рис. 2а). Приконттактні області поєднуються основними носіями. Це приводить до появи об'ємних зарядів поблизу границі, утворених нерухливими зарядами іонізованих атомів домішки (рис. 2 б, в). По мірі наростання об'ємних зарядів наростає електричне поле, що протидіє дифузії основних носіїв (виникає потенційний бар'єр руху основних носіїв (рис.2 в) і дифузійні струми основних носіїв зменшуються. Різницю потенціалів цього поля називають контактною різницею потенціалів V_k , знак її відповідає збідненню приконттактних областей основними носіями струму. Подолати потенційний бар'єр можуть тільки ті з основних носіїв, енергія яких більше енергії потенційного бар'єра ($E_k = evk$, e – заряд електрона).

Одночасно з дифузійним струмом основних носіїв виникає зустрічний дрейфовий струм неосновних, тому що для них контактне електричне поле є прискорювальним. Дірки з n – області переходять в p – область (струм I_{pn}), а електрони з p – області – в n – область (струм I_{np}). Контактна різниця потенціалів зростає доти, поки потоки основних і неосновних носіїв через $p-n$ перехід не досягнуть динамічної рівноваги:

$$I_{nn} = I_{np}; \quad I_{pp} = I_{pn}.$$

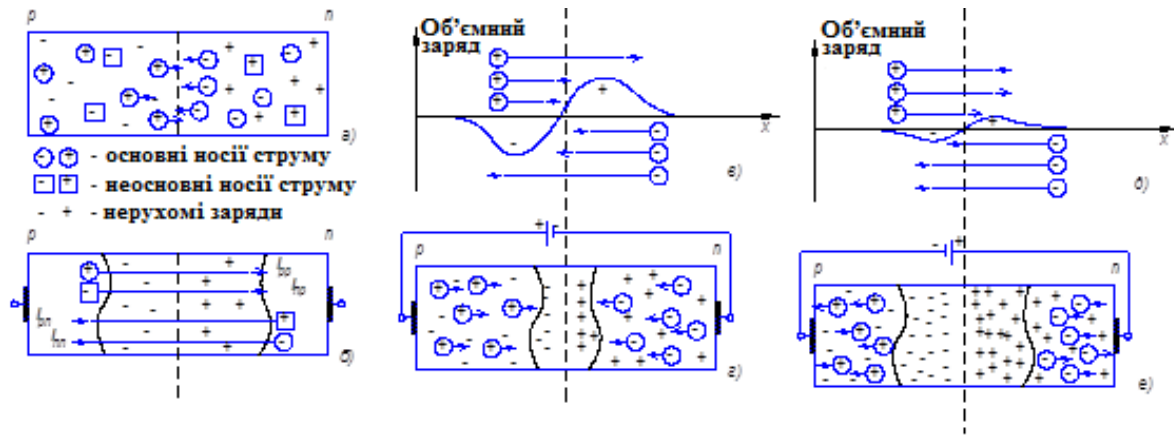


Рисунок 9.2 - Схематичне зображення процесів, що протікають поблизу p - n переходу

При цьому в зовнішньому ланцюзі струм відсутній:

$$I_1 = I_{nn} + I_{pp} - I_{np} - I_{pn} = 0.$$

При прикладенні зовнішньої напруги V_D потенційний бар'єр змінюється на величину eV_D . Рівновага струму порушується. При цьому потік неосновних носіїв через p - n перехід змінюється незначно, а струм основних носіїв залежить від V_D : при прямому включенні (плюс до p – області, мінус до n – області) контактна різниця потенціалів зменшується й струм основних носіїв дуже швидко зростає зі збільшенням V_D (рис. 9.2, г, д відповідає невеликій прямій напрузі $|V_D| < |V_k|$); при зворотному (замикаючому) включенні контактна різниця потенціалів збільшується й струм основних носіїв практично припиняється (рис. 9.2 е, ж). Вольт-амперна характеристика неосвітленого p - n переходу наведена на рис. 9.3 (крива $\Phi = 0$), де за позитивні прийняті: замикаюча напруга на діоді й зворотний струм діода.

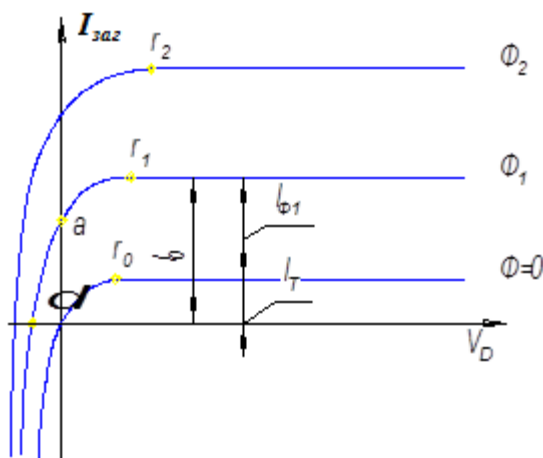


Рисунок 9.3 - Вольт-амперна характеристика напівпровідникового фотодіоду при освітленні з різною інтенсивністю Φ

При опроміненні однієї з областей випромінюванням з енергією квантів E_ϕ , що перевищує ширину забороненої зони власного напівпровідникового матеріалу цієї області (ΔE) – $E_\phi > \Delta E$ – в об'ємі напівпровідника генеруються пари нерівноважних носіїв струму – фотоелектрони й фотодірки (внутрішній фотоефект у власному напівпровіднику). Фотоносії, що диференціюють в об'ємі напівпровідника, досягають області p - n переходу, у контактному електричному полі відбувається просторовий поділ пар: основні фотоносії залишаються в об'ємі тієї області, де вони виникли; неосновні вільно проходять через p - n перехід, тому що для них контактне поле є прискорювальним. Таким чином, неосновні фотоносії створюють усередині p - n переходу додатковий струм, який називають фотострумом I_F .

При розімкнутому зовнішньому ланцюзі фотоносії накопичуються: основні в тій області, де вони виникли, неосновні – в іншій. Ці фотоносії утворюють об'ємний заряд i , отже, фото-ЕРС. Полярність фото-ЕРС, зворотня контактної різниці потенціалів, відповідає збагаченню областей основними носіями й збігається зі знаком напруги, прикладеної до p - n переходу в прямому напрямку. У результаті виникнення фото-ЕРС різниця потенціалів (потенційний бар'єр) зменшується, що викликає збільшення потоку основних носіїв через p - n перехід, спрямованого назустріч фотоструму усередині p - n переходу.

Фото-ЕРС зростає доти, поки не настане новий стан динамічної рівноваги між потоками основних і неосновних носіїв через p - n перехід.

При короткому замиканні зовнішнього ланцюга фотоносії, розділені електричним полем p - n переходу, будуть іти в зовнішній ланцюг, створюючи в ньому фотострум I_F .

Величина фотоструму в p - n переході, освітленому монохроматичним потоком Φ_x визначається виразом:

$$I_F = eN_F = e \frac{\Phi_\lambda}{n} \lambda (1 - \rho_x) \beta_\lambda \eta_\lambda = S_{\lambda l} \Phi_\lambda, \quad (9.1)$$

де: N_F – кількість неосновних фотоносіїв, що проходять через перехід в одиницю часу;

ρ_λ – коефіцієнт відбиття на поверхні напівпровідника;

n_λ – квантовий вихід внутрішнього фотоефекта;

β_λ – коефіцієнт збирання пар оптично генерованих носіїв (ефективність поділу пар);

$S_{\lambda l}$ – струмова монохроматична чутливість p - n переходу.

При прикладанні до опроміненого p - n переходу зовнішньої напруги в замикаючому напрямку потенційний бар'єр збільшується. При цьому струм основних носіїв через p - n перехід практично припиняється й у зовнішньому ланцюзі тече сумарний струм неосновних фотоносіїв (фотострум I_F) і термічно генерованих неосновних носіїв (темновий струм I_T), який називають загальним струмом $I_{заг}$:

$$I_{\text{заг}} = I_F + I_T .$$

Фотодіоди засновані на фотогальванічному ефекті й призначені для роботи як з прикладенням зовнішньої напруги (фотодіодний спосіб включення), так і без зовнішньої напруги (вентильний спосіб включення) на відміну від напівпровідникових фотоелементів, які працюють тільки у вентильному режимі.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) фотодіода (за позитивні напрямки приймаються: напрямом фотоструму; напрямом напруги, що замикає *p-n* перехід):

$$I_{\text{заг}} = I_F + I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_D}{KT}\right) \right], \quad (9.2)$$

де V_D – зовнішня напруга, прикладене до фотодіода;

$I_{\text{заг}}$ – загальний струм, що протікає через фотодіод; він дорівнює сумі фотоструму I_F і темнового струму I_T :

$$I_{\text{заг}} = I_F + I_T ;$$

I_T – темновий струм фотодіода, тобто струм, що протікає через фотодіод під час відсутності опромінення при заданому V_D :

$$I_T = I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_D}{kT}\right) \right]; \quad (9.3)$$

e – заряд електрона;

k – стала Больцмана, $k = 8,63 \cdot 10^{-5}$ [eV/K];

T – температура фоточутливого елемента фотодіода [K];

I_0 – зворотний струм *p-n* переходу фотодіода, утворений неосновними носіями заряду під час відсутності зовнішньої напруги й опромінення:

$$I_0 = I_{0\infty} \cdot \exp\left(-\frac{e\Delta E}{2kT}\right); \quad (9.4)$$

$I_{0\infty}$ – умовне значення зворотного струму при дуже великій температурі, коли іонізовані всі власні атоми напівпровідника;

ΔE – ширина забороненої зони власного напівпровідника;

I_F – фотострум:

$$I_F = S_I \cdot \Phi; \quad (9.5)$$

S_I – інтегральна струмова чутливість фотодіода;
 Φ – світловий потік, що падає на фото приймальну поверхню.

Підставляючи (9.4) в (9.3), одержимо:

$$I_T = I_{0\infty} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_D}{kT}\right) \right].$$

При практично використовуваних напругах живлення фотодіоду, що прикладаються в замикаючому напрямку: $evd \gg kT$, (при нормальній температурі 293 К $kT \approx 0,025$ eВ) тобто при

$$V_D = 1 \text{ В } \frac{eV_D}{kT} = 40 \text{ і } \exp\left(-\frac{eV_D}{kT}\right) \approx 0,4 \cdot 10^{-17} \ll 1.$$

Тому можна вважати, що температурна характеристика темного струму має вигляд:

$$I_T = I_{0\infty} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \quad (9.6)$$

тобто величина й температурна характеристика темного струму визначаються величиною ширини забороненої зони власного напівпровідника ΔE .

Відзначимо, що у формулу фотосигналу фотодіода – фотоструму I_F – температура не входить, тобто він мало залежить від температури. Це одна з важливих переваг фотодіода.

Графіки вольт-амперних характеристик фотодіода наведені на рис. 9.3 і показують, що фотодіод – суттєво нелінійний електричний елемент.

Залежно від способу включення фотодіода й способу виміру фотосигналом може слугувати або фотострум або напруга фотосигналу.

Фотострум фотодіода перетворюється в напругу фотосигналу за допомогою включення в електричне коло опору навантаження R_H .

Застосовують два основних способи включення фотодіода:

- фотодіодний режим (рис. 9.4, а);
- вентильний режим (рис. 9.4, б).

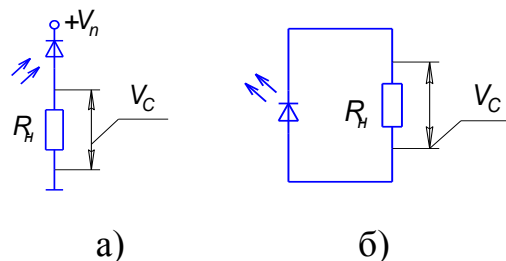


Рисунок 9.4 - Фотодіодний (а) та вентильний (б) режими роботи фотодіода

Вентильний режим характерний відсутністю зовнішнього джерела живлення, тобто використовується здатність p - n переходу фотодіода генерувати фотосигнали – фотострум або фото-ЕРС.

У фотодіодному режимі зовнішня напруга V_D прикладається в замикаючому напрямку.

9.2 Порядок виконання роботи

1. За допомогою запропонованих інструкцій, що перебувають близько відповідного встаткування, ознайомитися з особливостями використовуваних приладів і зібрати вимірювальний стенд. До складу вимірювального стенду входять: джерело постійної напруги Нuaуі НУ-1502, світлодіод, досліджуваний фотодіод та характерограф Л2-56 за допомогою якого здійснюється реєстрація ВАХ фотодіоду.

2. Зафіксуйте на екрані характерографу в оптимальному масштабі вольт-амперну характеристику фотодіода $I_T = f(U)$ при відсутності світлового впливу та оцифруйте її. Результати оцифровки занесіть в таблицю 9.1. Зверніть увагу, щоб фотодіод був захищений від випадкового світлового впливу.

Таблиця 9.1 – Результати виміру темної вольт-амперної характеристики фотодіода

$U, \text{В}$								
$I_T, \text{мА}$								

3. Почергово зафіксуйте на екрані характерографу в оптимальному масштабі вольт-амперні характеристики фотодіода $I=f(U)$ при наявності світлового впливу. Характеристика знімається при трьох значеннях світлового потоку, що падає на фотодіод, які задаються величиною струму, що протікає крізь світлодіод: $I_{CD} = 5 \text{ мА}$, $I_{CD} = 10 \text{ мА}$, $I_{CD} = 20 \text{ мА}$. Оцифруйте одержані ВАХ, а результати занесіть в таблицю 9.2.

Таблиця 9.2 – Результати виміру вольт-амперних характеристик фотодіода при наявності світлового впливу

$U, \text{В}$								
$I_T, \text{мА при } I_{CD} = 5 \text{ мА}$								
$I_T, \text{мА при } I_{CD} = 10 \text{ мА}$								
$I_T, \text{мА при } I_{CD} = 20 \text{ мА}$								

4. По отриманим даним побудувати графіки темної та світлових вольт-амперних характеристик фотодіоду.

9.3 Контрольні питання

1. Які основні параметри фотодіодів?
2. Перелічіть основні характеристики фотодіодів і їх особливості.
3. У пристроях якого типу можуть застосовуватися фотодіоди?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10

ХАРАКТЕРИСТИКИ Й ПАРАМЕТРИ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Мета роботи – Вивчити властивості біполярного транзистора шляхом зняття вхідних і вихідних характеристик. Освоїти розрахунки параметрів за характеристиками транзистора.

10.1 Загальні відомості

Біполярний транзистор - напівпровідниковий прилад, що має два $p-n$ переходи й використовується для посилення й генерування електричних коливань.

Основним елементом транзистора є кристал напівпровідникового матеріалу, у якому створено три області з різних типом провідності. Середня область, утворена напівпровідником з електронним або дірковим типом провідності, називається базою. Ширина бази робиться дуже малою. Дві крайні області, одна з яких називається емітером, а інша - колектором, мають провідність однакового типу, протилежного провідності бази, і на кілька порядків вище провідності бази. Емітер є джерелом основних носіїв заряду (електронів або дірок), а колектор їх приймачем. Якщо зовнішні області мають провідність p типу - прилад називають транзистором типу $p-n-p$, якщо ж зовнішні області мають провідність типу n , то прилад називають транзистором типу $n-p-n$.

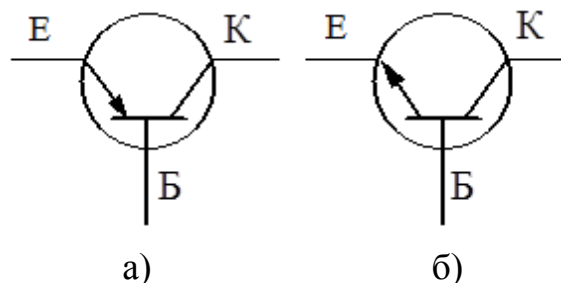


Рисунок 10.1 - Графічне зображення транзисторів

Умовне графічне зображення транзистора типу $p-n-p$ наведено на рис.10.1, а, транзистора типу $n-p-n$ на рис. 10.1, б. Подальший виклад дається стосовно до транзистора типу $p-n-p$.

Найбільш важливим режимом роботи транзистора є активний. У цьому режимі до емітерного переходу прикладена напруга в прямому напрямку, тобто позитивний полюс емітерного джерела енергії E_E підключений до емітеру. (У літературі часто вживається термін «перехід зміщений у прямому напрямку»).

До колекторного переходу прикладена напруга у зворотному напрямку, тобто негативний полюс колекторного джерела енергії E_K підключений до колектора (перехід зміщений у зворотному напрямку). Під дією напруги емітерного джерела енергії E_E відбувається інжекція (перехід) дірок з емітера в базу, для якої вони є неосновними носіями.

Електрони бази інжектуються до емітеру, у якому вони також стають неосновними. Але оскільки провідність бази набагато менше провідності емітера, число дірок, що надходять із емітера в базу, значно перевищує число електронів, перешедших з бази до емітера. Отже, струм крізь емітерно-базовий перехід обумовлений практично одними дірками. Дірки, інжектовані до бази, частково рекомбінують із електронами бази, які утворюють струм бази (рис. 10.2). Але оскільки ширина бази мала, майже всі дірки перетинають базу й досягають колекторного переходу. В області колекторного переходу дірки потрапляють в електричне поле, створюване джерелом E_K . Це поле є для дірок прискорювальним і вони втягуються в колектор, створюючи струм колектора I_K . Величина струму I_K , як впливає з першого закону Кірхгофа, визначається рівнянням 1:

$$I_K = I_e - I_{\delta}, \quad (10.1)$$

а оскільки струм бази малий, можна вважати, що

$$I_K = I_e. \quad (10.2)$$

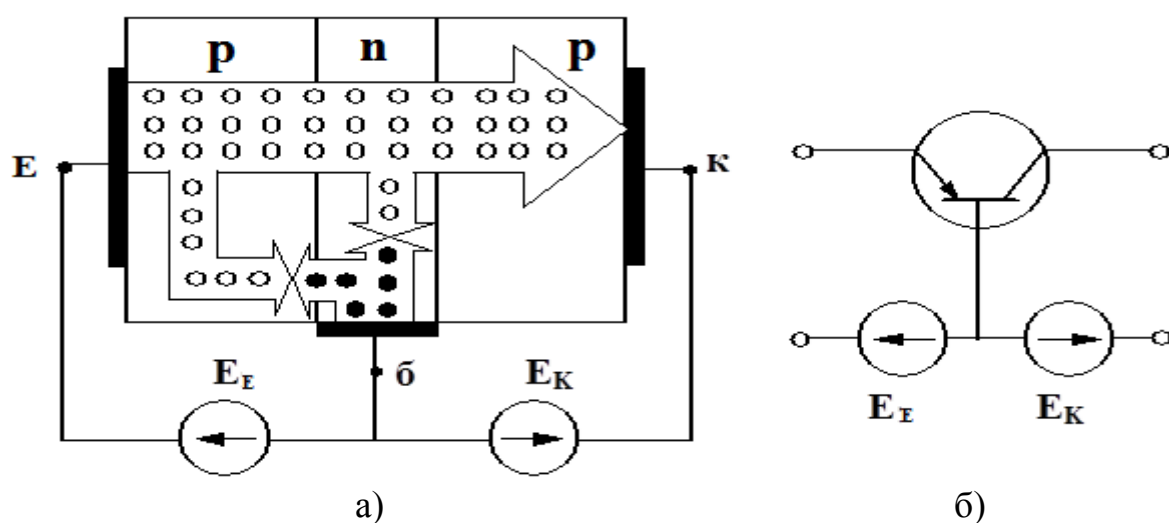


Рисунок 10.2 - Розподіл струмів у транзисторі (а, о - дірки, • - електрони) та включення транзистора за схемою із загальною базою (б)

Змінюючи напругу, прикладену до емітерно-базового переходу, можна змінювати кількість дірок, що надходять з емітера в базу, і, отже, змінювати струм колектора. Таким чином, принцип дії транзистора полягає в керуванні потоком неосновних носіїв бази, що надходять у колектор.

Оскільки опір колекторного переходу на кілька порядків вище опору емітерного переходу, у ланцюг колектора можна включити навантажувальний резистор з досить великим опором R_n , більшим ніж опір емітерного переходу R_e . Включення такого навантаження не змінить режиму роботи переходів. У цьому випадку спадання напруги на навантажувальному резисторі буде $U_n = I_k R_n$, а напруга на емітерному переході $U_e = I_e R_e$, а оскільки $R_n \gg R_e$, і з урахуванням співвідношення (10.2),

$$U_n \gg U_e, \quad (10.3)$$

тобто має місце посилення по напрузі.

Вхідна потужність, затрачувана у емітерному ланцюзі $P_{вх} = I_e U_e$, вихідна потужність, що виділяється в навантажувальному резисторі буде $P_{вих} = I_k U_n$. З урахуванням співвідношень (10.2) і (10.3)

$$P_{вих} \gg P_{вх}, \quad (10.4)$$

і, отже, має місце посилення по потужності.

Аналогічні результати виходять і у випадку подачі на емітерний перехід змінної напруги.

Додаткова потужність, що виділяється на навантажувальному резисторі одержується за рахунок колекторного джерела енергії E_k . Транзистор, таким чином, керує енергією колекторного джерела, змушуючи її змінюватися за законом зміни вхідної напруги.

Очевидно, що посилення по напрузі й потужності буде тим більше, чим більше струм колектора, тобто чим більша частина дірок, інжекттованих емітером, буде переноситися в колектор. Ефективність цього процесу характеризується коефіцієнтом передачі струму емітера (α), яким називається відношення збільшення струму колектора до того збільшення, струму емітера, що його викликало, при постійній напрузі між колектором і базою, тобто

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} \quad \Bigg| \quad U_{к.б.} = \text{const.} \quad (10.5)$$

Ясно, що чим більше коефіцієнт передачі струму, тем вище коефіцієнти підсилення по напрузі й потужності.

Як впливає з співвідношень (10.1) і (10.5), коефіцієнт передачі струму емітера завжди менше одиниці. Для сучасних транзисторів він досягає значень 0,950 - 0,998.

У розглянутій схемі загальною крапкою вхідний і вихідний ланцюгів є база, тому таке включення транзистора називається схемою із загальною базою (ЗБ). Однак на практиці найбільше часто використовується схема із загальним емітером (ЗЕ) (рис. 10.3).

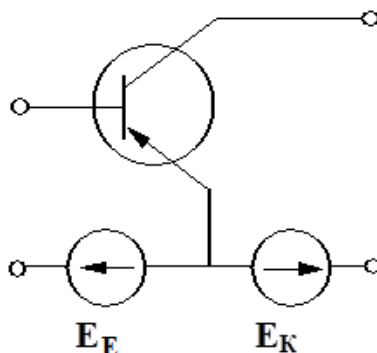


Рисунок 10.3 - Включення транзистора за схемою із загальним емітером

Фізичні процеси в транзисторі, включеному за схемою з ЗЕ, аналогічні описаним вище. Але оскільки вхідним струмом у цій схемі є струм бази, який як вказувалося вище, дуже малий, коефіцієнт передачі струму бази (β) значно більше, ніж коефіцієнт передачі струму емітера α .

$$\beta = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta}} \quad \left| \quad U_{\kappa.e.} = \text{const.} \right. \quad (10.6)$$

Спільне розв'язання рівнянь (10.1), (10.5) і (10.6) дає:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (10.7)$$

Аналіз рівняння (10.7) показує, що β може досягати декількох десятків. Тому коефіцієнти підсилення по напрузі й по потужності в цьому випадку також будуть значно вище.

Незалежно від схеми включення транзистора, величина вихідного струму (i_2) (у розглянутих схемах - струм колектора), визначається величинами вхідного струму (i_1) (у схемі із ЗБ - струм емітера, у схемі з ЗЕ - струм бази) і вихідної напруги (u_2) (у схемі із ЗБ - напруги між колектором і базою, у схемі з ЗЕ - напруги між колектором і емітером), тобто

$$i_2 = f(i_1, u_2). \quad (10.8)$$

Функцією тих же змінних є величина вхідної напруги (u_1) (у розглянутих схемах напруга на емітерному переході), тобто

$$u_1 = f(i_1, u_2) \quad (10.9)$$

Отже, для вхідної напруги й вихідного струму можна записати співвідношення повних диференціалів

$$du_1 = \left(\frac{\partial u_1}{\partial i_1} \right) di_1 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial u_2} \right) du_2; \quad (10.10)$$

$$di_2 = \left(\frac{\partial i_2}{\partial i_1} \right) di_1 + \left(\frac{\partial i_2}{\partial u_2} \right) du_2. \quad (10.11)$$

Часткові похідні, що входять у рівняння (10.10) і (10.11), називаються h -параметрами транзистора. Їхні величини характеризують якість транзистора й можливість його роботи в тому або іншому пристрої.

Часткова похідна $\frac{\partial u_1}{\partial i_1}$ визначає залежність вхідного спадання напруги від вхідного струму при постійній вихідній напрузі u_2 ; цей параметр називається вхідним опором і позначається h_{11} .

$$h_{11} = \left. \frac{\partial u_1}{\partial i_1} \right| du_2 = 0. \quad (10.12)$$

У сучасних транзисторів вхідний опір у схемі з ЗЕ повинен становити кілька сотень Ом.

Часткова похідна $\frac{\partial u_1}{\partial u_2}$ визначає залежність вхідної напруги від вихідної напруги при постійному вхідному струмі i_1 ; цей параметр безрозмірний, він називається коефіцієнтом зворотного зв'язку й позначається h_{12} .

$$h_{12} = \left. \frac{\partial u_1}{\partial u_2} \right| di_1 = 0. \quad (10.13)$$

Величина коефіцієнта зворотного зв'язку звичайно дуже мала й у більшості практичних розрахунків транзисторних пристроїв їм зневажають.

Часткова похідна $\frac{\partial i_2}{\partial i_1}$ визначає залежність вихідного струму від вхідного при постійній вихідній напрузі u_2 . Цей параметр безрозмірний, він називається коефіцієнтом передачі струму й позначається h_{21} .

$$h_{21} = \left. \frac{\partial i_2}{\partial i_1} \right| du_2 = 0. \quad (10.14)$$

Чим більше цей параметр, тем вище коефіцієнти підсилення по напрузі й потужності.

Часткова похідна $\frac{\partial i_2}{\partial u_2}$ визначає залежність вихідного струму від вихідної напруги при постійному вхідному струмі. Цей параметр має розмірність провідності, називається вихідною провідністю транзистора й позначається h_{22} .

$$h_{22} = \left. \frac{\partial i_2}{\partial u_2} \right|_{di_1 = 0} \quad (10.15)$$

Величина цього параметра визначає величину опору навантажувального резистора, який може бути включений у вихідний ланцюг.

h - параметри легко розрахувати за сімействами характеристик транзистора.

Розрізняють вхідні характеристики, які визначають залежність вхідного струму i_1 від вхідної напруги u_1 при постійній вихідній напрузі u_2 ; а також вихідні характеристики, що визначають залежність вихідного струму i_2 від вихідної напруги u_2 при постійному вхідному струмі i_1 .

Вхідна характеристика транзистора, включеного за схемою з ЗЕ - $I_b = f(U_{e.b.})$ при $U_{к.е.} = 0$ подібна вольт-амперній характеристиці напівпровідникового діода в прямому напрямку (рис. 10.4).

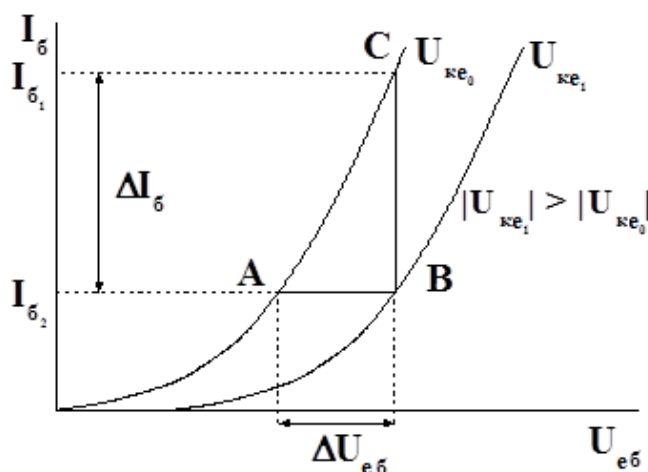


Рисунок 10.4 - Вхідні характеристики транзистора в схемі з ЗЕ

Оскільки колекторно-базовий перехід включений у зворотному напрямку, при збільшенні напруги на колекторі ширина замикаючого шару колекторного переходу буде рости, а ширина бази відповідно - зменшуватися. За рахунок цього зменшується рекомбінація носіїв у базі й струм бази. Отже, характеристика зміститься вниз (рис. 10.4, крива $U_{к.е.1}$). Для визначення параметрів транзистора, на прямолінійній ділянці вхідних характеристик

будується трикутник ABC. Сторона BP цього трикутника дає збільшення струму бази $\Delta I_{\bar{b}}$ при зміні напруги на величину $\Delta U_{e\bar{b}} = AB$ при $U_{ке} = \text{const}$. Тоді

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{e\bar{b}}}{\Delta I_{\bar{b}}} \right| U_{ке} = \text{const}. \quad (10.16)$$

При незмінному струмі бази, наприклад, $I_{\bar{b}1} = \text{const}$, зміна колекторної напруги на величину $\Delta U_{ке} = U_{ке0} - U_{ке1}$ як видно з рис. 10.4, повинно приводити до зміни вхідної напруги на величину $\Delta U_{e\bar{b}} = AB$. Тоді

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{e\bar{b}}}{\Delta U_{ке}} \right| I_{\bar{b}} = \text{const}. \quad (10.17)$$

Вихідна характеристика транзистора, включеного за схемою з ЗЕ, являє собою залежність $I_{\kappa} = f(U_{ке})$ при $I_{\bar{b}} = \text{const}$. Оскільки колектор утворений дірками емітера, він мало залежить від колекторної напруги. Проте при збільшенні колекторної напруги, як уже говорилося, відбувається зменшення ширини бази й зменшення рекомбінації в базі.

У силу сталості базового струму число електронів, що надходять у базу залишається незмінним. За рахунок цього потенціал бази відносно емітера знижується й збільшується число дірок, що надходять у базу з емітера. Відповідно до рівняння (10.2) це приводить до росту струму колектора.

При постійній напрузі між емітером і колектором, наприклад, при $U_{ке1} = \text{const}$ (рис. 10.5), зміна струму бази від $I_{\bar{b}1}$ до $I_{\bar{b}2}$, тобто на величину $\Delta I_{\bar{b}} = I_{\bar{b}2} - I_{\bar{b}1}$, приводить до збільшення струму колектора на величину $\Delta I_{\kappa} = I_{\kappa 2} - I_{\kappa 1}$.

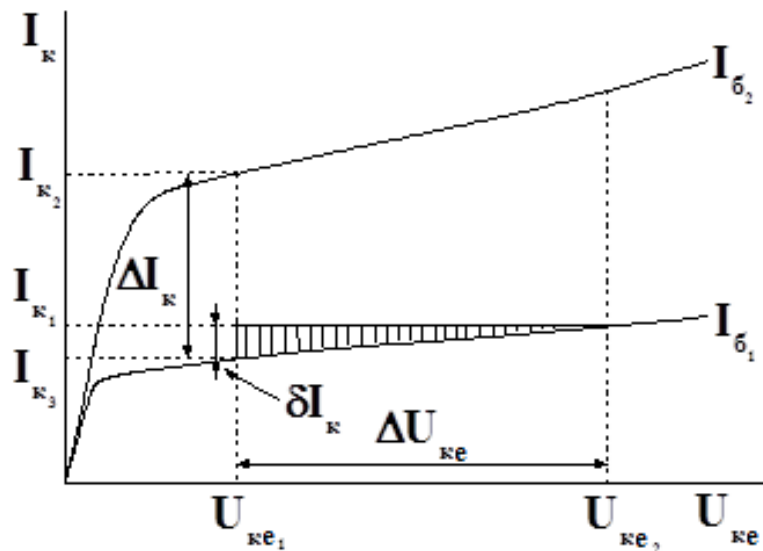


Рисунок 10.5 - Вихідні характеристики транзистора в схемі з ЗЕ

Тоді

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\delta}} \bigg|_{U_{\kappa e} = \text{const}} \quad (10.18)$$

При постійному струмі бази, наприклад $I_{\delta 1} = \text{const}$ зміна напруги між колектором і емітером на величину $\Delta U_{\kappa e} = U_{\kappa e 2} - U_{\kappa e 1}$ приводить до зміни струму колектора на величину $\delta I_{\kappa} = I_{\kappa 3} - I_{\kappa 1}$ (рис. 10.5). Тоді

$$h_{22} = \frac{\delta I_{\kappa}}{\Delta U_{\kappa e}} \bigg|_{I_{\delta} = \text{const}} \quad (10.19)$$

10.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомтеся з інструкцією вимірювання характеристик транзисторів за допомогою характерографу Л2-56.
2. Підключіть досліджуваний транзистор до характерографу за схемою з загальним емітером.
3. Згідно з наявною на робочому місці інструкцією домогтися зображення на екрані характерографу в оптимальному масштабі сімейства вихідних характеристик транзистора для схеми з загальним емітером – $I_c = f(U_{ce})$.
4. Оцифруйте одержані вихідні характеристики транзистору та занесіть дані у таблицю.
5. Виведіть характерограф у режим спостереження характеристики прямої передачі по струму для схеми із загальним емітером $I_c = f(I_b)$.
6. На міліметровому папері побудуйте графіки залежностей $I_c = f(U_{ce})$ та $I_c = f(I_b)$.
7. Розрахуйте h параметри транзисторів.
8. Зробіть висновок про вплив напруги між емітером і базою на величину струму бази.
9. Зробіть висновок про вплив напруги між емітером і колектором на величину струму бази при постійній напрузі між емітером і базою.
10. Зробіть висновок про вплив напруги між емітером і колектором на величину струму колектора при постійному струмі бази.
11. Зробіть висновок про вплив струму бази на величину струму колектора при постійній напрузі між колектором і емітером.

10.3 Контрольні питання

1. У чому полягає принцип дії транзистора?
2. Якими носіями утворений струм емітера транзистора типу $p - n - p$?
3. Якими носіями утворений струм бази транзистора типу $p - n - p$?
4. Якими носіями утворений струм колектора транзистора типу $p - n - p$?

5. Що таке коефіцієнт передачі струму еміттера?
6. Що таке коефіцієнт передачі струму бази?
7. Запишіть зв'язок між коефіцієнтами передачі струму еміттера й бази?
8. Назвіть параметри транзистора й дайте їхнє фізичне тлумачення?
9. Що таке зворотний струм колектора $I_{ко}$, які причини його виникнення?
10. Як залежить величина концентрації неосновних носіїв у напівпровіднику від температури?
11. Як міняється положення вихідних характеристик транзистора при підвищенні температури?
12. При якому включенні транзистора вплив температури на вихідні характеристики позначається найбільше сильно?

ЛІТЕРАТУРА

1. Лівшиць, Н. С., Радіотехнічні виміри. Підручник для профес.-технич. Учеб. Закладів / Н. С. Лівшиць, Б. Е. Телешевский. - М. : "Вища школа", 1972. - 208 с.
2. Меерсон, А. М. Радіовимірювальна техніка. - 3-е изд., перераб. і доп. / А. М. Меерсон. - Л. : Енергія, 1978. - 408 с.
3. Зайчик, І. Ю. Практикум по электрорадиоизмерениям: Учеб. посібник для учнів радиотехн. технікумів. - 2-е изд., перераб. і дополн. / І. Ю. Зайчик, Б. І. Зайчик. - М. : Высш. шк., 1985. - 239с.
4. Фриш С. Є., Тиморева А. В. Курс загальної фізики. Т. П. М., 1962.
5. Сивухин Д. В. Загальний курс фізики. Т. Ш: Електрика. М., 1977.
6. Трофімова Т.І. Курс фізики М., 1990
7. Електротехнічний справочник. под. ред. І.Н. Орлова й ін. Т.3 Кн.2 Розділ 60 Джерела вторинного електроживлення - М.: Энергоатомиздат, 1988. - с. 490-533.
8. Гельфанд Я.С. Випрямні блоки живлення й зарядні пристрої в схемах релейного захисту. - М.: Енергія, 1971.
9. Напівпровідникові прилади (Довідник) под. редакцією Н.Н. Горюнова – М.: Энергоиздат, 1982.
10. Негасила А.В. Довідкова допомога з електротехніки й основам електроніки - М.: Вища школа, 1986.
11. Алексєєв О.В. і ін. Електротехнічні пристрої. - М.: Энергоиздат, 1981. - 336 с.
12. Бакалов В.П. и др. Основы теории электрических цепей и электроники: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1989. - 528 с.
13. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники: Уч. пособие для вузов:- М.: Высш. школа, 1988. - 464 с.
14. Добротворский И.Н. Теория электрических цепей. Учебник для техникумов.- М.: Радио и связь, 1989. - 465 с.

15. Веселовский О.Н., Браславский Л.М. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры. Учеб. пособие для вузов. М., Высш. школа, 1977. - 312 с.
16. Добротворский И.Н. Теория электрических цепей. Задачник: Учеб. пособие для техникумов.- М.: Радио и связь, 1994. - 360 с.
17. Ерофеев Ю.Н. Импульсные устройства. Уч. пособие для вузов.- 3 изд., М.: Высш. школа, 1989.
18. Попов В.П. Основы теории цепей: Учеб. для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2000 – 575 с.
19. Яцкевич В.В. Теория линейных электрических цепей. Справочное пособие. М.: Высш. школа, 1990. - 264 с.
20. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Издание 2-е, переработ.и доп., Л., «Энергия», 1972. - 816 с.
21. 3. Татур Т.А., Татур В.Е. Анализ электрических цепей. Часть I. Установившиеся процессы в линейных электрических цепях. – М.: Издательство МЭИ, 1994. – 184 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУП.....	3
Правила внутрішнього розпорядку і техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт.....	4
Загальні методичні рекомендації щодо виконання лабораторних робіт.....	5
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 1	
Стрілочні й цифрові вимірювальні прилади.....	8
1.1. Загальні відомості.....	8
1.1.1. Вимірювальні механізми.....	8
1.1.2. Умовні графічні позначення на шкалі.....	12
1.2. Порядок виконання роботи.....	13
1.2.1. Устаткування робочого місця.....	13
1.2.2. Порядок дій.....	13
1.3. Контрольні питання.....	13
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 2	
Електричний струм. Послідовне та паралельне з'єднання опорів.....	14
2.1. Загальні відомості.....	14
2.1.1. Електричний струм.....	14
2.1.2. Електрорушійна сила.....	17
2.1.3. Закон Ома в інтегральній формі.....	19
2.1.4. Закон Ома у диференціальній формі.....	20
2.1.5. Закони Джоуля – Ленца.....	22
2.1.6. Послідовне та паралельне з'єднання опорів.....	22
2.2. Порядок виконання роботи.....	26
2.2.1. Устаткування робочого місця.....	26
2.2.2. Порядок дій.....	26
2.3. Контрольні питання.....	27
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 3	
Змінний струм.....	28
3.1. Загальні відомості.....	28
3.1.1. Визначення змінного струму.....	28
3.1.2. Ланцюг змінного струму.....	29
3.1.3. Метод векторних діаграм.....	32
3.2. Порядок виконання роботи.....	35
3.3. Контрольні питання.....	36
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 4	
Дослідження однофазних випрямлячів.....	36
4.1. Загальні відомості.....	36
4.1.1. Однополуперіодна схема випрямляча.....	36
4.1.2. Двухполуперіодна схема випрямлення з нульовим виводом.....	37
4.1.3. Мостова схема випрямлення.....	39
4.1.4. Схема подвоєння напруги.....	41
4.2. Порядок виконання роботи.....	42
4.3. Контрольні запитання.....	43

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 5	
Згладжувальні фільтри.....	44
5.1. Загальні відомості.....	44
5.1.1. Різновиди фільтрів, застосовуваних для згладжування пульсацій змінної складової напруги.....	44
5.1.2. Ємнісний фільтр.....	46
5.1.3. Індуктивний фільтр.....	47
5.1.4. Г - образні індуктивно-ємнісні (LC) і активно-ємнісні (RC) фільтри.....	48
5.1.5. П – образний фільтр.....	51
5.1.6. Багатошанкові фільтри.....	51
5.1.7. Резонансні фільтри.....	51
5.1.8. Активні фільтри.....	53
5.2. Порядок виконання роботи.....	55
5.2.1. Завдання для виконання роботи.....	55
5.2.2. Порядок дій.....	55
5.2.3. Віртуальне середовище Electronic Workbench.....	56
5.3. Контрольні запитання.....	57
6. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 6	
Вимір індукції магнітного поля за допомогою тесламетра.....	57
6.1. Загальні відомості.....	57
6.1.1. Теорія магнітного поля.....	57
6.1.2. Вимірювання магнітного поля.....	58
6.2. Порядок виконання роботи.....	59
6.3. Контрольні питання.....	60
7. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 7	
Випробування однофазного трансформатора.....	60
7.1. Загальні відомості.....	60
7.1.1. Основні параметри однофазних трансформаторів.....	60
7.1.2. Дослідження холостого ходу трансформатора.....	62
7.1.3. Дослідження струму короткого замикання трансформатора.....	62
7.2. Порядок виконання роботи.....	63
7.2.1. Схема лабораторної установки.....	63
7.2.2. Порядок виконання роботи.....	63
7.3. Контрольні питання.....	65
8. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 8	
Вимірювання вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода й визначення його параметрів.....	65
8.1. Загальні відомості.....	65
8.2. Порядок виконання роботи.....	68
8.3. Контрольні питання.....	69
9. ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА 9	
Дослідження параметрів напівпровідникового фотодіода.....	70
9.1. Загальні відомості.....	70

9.2. Загальні відомості.....	76
9.3. Контрольні питання.....	77
10. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10	
Характеристики й параметри біполярних транзисторів.....	77
10.1. Загальні відомості.....	77
10.2. Порядок виконання роботи.....	84
10.3. Контрольні питання.....	84
ЛІТЕРАТУРА.....	85

[illegible]

[illegible]

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Теорія електричних кіл»
для студентів напрямку 6.05080101
«Мікро- та наноелектроніка»

Укладачі: ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович
КІРІЧЕНКО Михайло Валерійович
ГОРБУЛИК Володимир Іванович
ХРИПУНОВ Геннадій Семенович

Відповідальний за випуск Д.А. Кудій

Роботу до видання рекомендувала О.А. Любченко

План 2014 р.

Підписано до друку 16.01.15. Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 4,6.
Обл.-вид. 3,2. Тираж 50 прим. Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ “ХПІ”. 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Друкарня НТУ “ХПІ”. 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

